

Distribution of the Drop Substance in the Target Fluid at the Coalescence Intrusive Mode

Yu. D. Chashechkin, A. Yu. Ilinykh

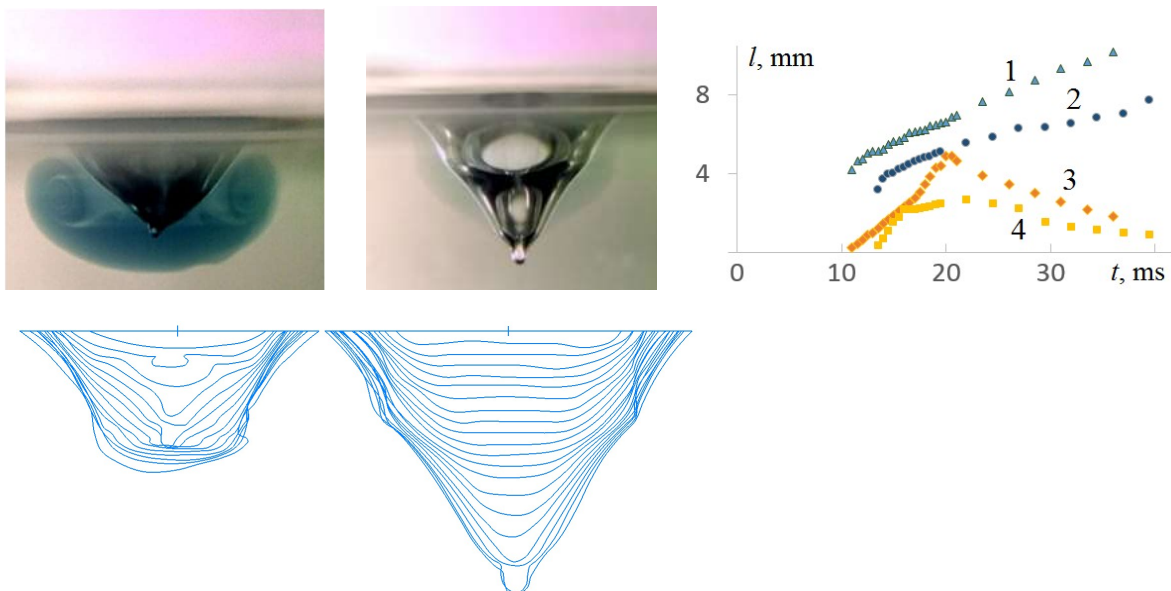
*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences
Moscow, 119526, Russia*

chakin@ipmnet.ru
ilynykh@ipmnet.ru

Abstract

High-speed video recording was used to trace the matter transfer pattern of a freely falling colored water drop and the deformation of the free surface of the target fluid in the intrusive mode, when the available potential surface energy (APSE) exceeds the drop kinetic energy. At the initial stage of submerging, the free surface of the unified drop-target fluid system remains convex. The inflowing drop forms a lenticular intrusion in the fluid bulk, which gradually transforms into a vortex ring. The cavity begins to form with a time delay $\Delta t = 10 \div 12$ ms. The surface of the cavity includes traditional flat, spherical, as well as cylindrical and conical sections moving at different velocities. The temporal variability of the intrusion and cavern geometry has been traced. In the wake, past the submerging ring, the drop matter is preserved in the form of individual fibers.

Keywords: drop, cavern, intrusion, vortex, matter transport.



Evolution of the impact pattern of an aqueous ink drop ($D = 4.3$ mm, $U = 0.34$ m/s, $E_\sigma = 4$ μ J, $E_k = 2.24$ μ J, $Re = 1460$, $Fr = 2.8$, $We = 6.7$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$, $R_E = E_k/E_\sigma = 0.56$, $R_W = 2 \times 10^{-5}$)

УДК 532.5

Распределение вещества капли в принимающей жидкости в интрузивном режиме слияния

Ю. Д. Чашечкин, А. Ю. Ильиных

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

chakin@ipmnet.ru

ilynykh@ipmnet.ru

Аннотация

Методом высокоскоростной видеорегистрации прослежена картина переноса вещества свободно падающей капли воды и деформация свободной поверхности принимающей жидкости в интрузивном режиме, когда доступная потенциальная поверхностная энергия (ДППЭ) превышает кинетическую энергию капли. На начальном этапе слияния свободная поверхность объединенной системы «капля – жидкость» остается выпуклой. Втекающая капля образует в толще жидкости чечевицеобразную интрузию, которая постепенно преобразуется в вихревое кольцо. Каверна начинает формироваться с запаздыванием $\Delta t = 10 \div 12$ мс. Поверхность каверны включает участки различной формы – традиционные плоские и сферические, а также цилиндрические и конические, движущиеся с различной скоростью. Прослежена временная изменчивость геометрии интрузии и каверны. В следе за погружающимся кольцом вещество капли сохраняется в виде отдельных волокон.

Ключевые слова: капля, каверна, интрузия, вихрь, перенос вещества.

1. Введение

Наблюдения процесса формирования каскадов вихрей в первых регулярных исследованиях импакта свободно падающей капли окрашенной жидкости [1], инициированные выразительными зарисовками вихрей [2], оказавшие большое влияние на развитие математики, физики, биологии и ряда других наук [3], стимулировали разработку новых методов регистрации картин течений. Фотографирование с искровым освещением позволило идентифицировать в эволюционирующем течении каверну, венец, всплеск, кольцевые капиллярные волны и проследить их развитие [4, 5]. Информативность опытов повысилась с изобретением еще более интенсивных источников света – ламп-вспышек и газонаполненных ламп [6] в сочетании с кинокамерами, а позднее, и видеокамерами, скорость съемки которых превышает 1 млн. кадров в секунду [7].

В последующих опытах по регистрации картины распределения окрашенной жидкости капли в прозрачной принимающей жидкости – объекте активных гидродинамических исследований на протяжении многих лет [8, 9], эволюция вихревых колец импакта одиночной капли прослежена все более детально. В последние годы было установлено, что вещество капли равномерно распределяется по поверхности каверны только при малых и умеренных контактных скоростях – в интрузивном режиме. При этом капля плавно втекает в толщу жидкости с сохранением выпуклой формы свободной поверхности, каверна образуется с задержкой в $\Delta t = 10 \div 12$ мс [10]. С увеличением скорости падающая капля расщепляется в области контакта сливающихся жидкостей на отдельные волокна, разделенные принимающей жидкостью [11]. Волокна образуют линейчатые и сетчатые узоры на поверхности каверны и

венца [12]. Волокнистая структура распределения вещества капли сохраняется длительное время в ходе последующей эволюции течения и в глубокой [13], и в мелкой принимающей жидкости [14]. Картины волокнистых течений в импактном режиме слияния свободно падающей капли зарегистрированы в широком диапазоне размерных и безразмерных параметров задачи.

В интрузивном режиме слияния капли детальные исследования эволюции картины течения ранее не проводились. Цель работы – визуализация и анализ картины распределения окрашенного вещества в прозрачной принимающей жидкости в режиме плавного слияния капли с запаздыванием начала формирования каверны.

2. Параметризация течений

Основу методики проведенных экспериментов составляет система фундаментальных уравнений механики жидкостей, описывающая перенос плотности, импульса и энергии [15]. Жидкость или газ определяется как сплошная текущая среда с внутренней энергией, представляемой дифференциалом потенциала Гиббса $dG = -s_e dT + V dP + S_b d\sigma + \mu_i dS_i$ [16]. Производные потенциала Гиббса G определяют термодинамические величины: плотность ρ и удельный объем $V = 1/\rho$, энтропию s_e , давление P , температуру T , концентрацию растворенных веществ и взвешенных частиц S_i , химический потенциал i -го компонента μ_i , коэффициент поверхностного натяжения σ . Некоторые из величин, в частности давление или плотность, имеют прямой механический и расширенный физический смысл. Функциональные связи между потенциалом Гиббса $G = G(\rho, P, T, S_i, \sigma)$ и отдельными термодинамическими величинами, а также плотности с другими параметрами $\rho = \rho(P, T, S_i)$, образуют уравнения состояния, замыкающие систему определяющих уравнений [15, 17].

Молекулярный перенос импульса, температуры и вещества характеризуют коэффициенты динамической μ_i и кинематической $\nu = \mu/\rho$ вязкости, температуропроводности κ_T и диффузии κ_S . Среду также характеризуют скорости распространения волн (звуковых c_s , электромагнитных c_l), параметры переноса зарядов – удельная электропроводность η и коэффициент преломления света n .

Течения жидкостей, которые определяются как внутренне присущий или вынужденный совместный перенос импульса, энергии и вещества, описывает масштабно инвариантная система, все уравнения которой были приведены в первом издании трактата [17] выпуска 1944 г. Базовые характеристики течений жидкостей – плотность, импульс, энергия, относятся к классу наблюдаемых величин, методики опытов позволяют оценить погрешность измерения одновременно с определением значения. Система фундаментальных уравнений механики жидкостей дополняется физически обоснованными граничными условиями: на твердых стенках – прилипания (no-slip) для скорости и непротекания (no-flux) для вещества, кинематическими и динамическими условиями на свободной поверхности [15, 17]. Большая теплоемкость жидкостей позволяет в ряде задач пренебречь температурными эффектами и получать экспериментально проверяемые решения редуцированной системы фундаментальных уравнений, учитывающих гетерогенность плотности и формирующей ее солености.

Рассмотрение полной системы уравнений и граничных условий [15, 17] применительно к задачам импакта капли, показывает, что в число основных размерных параметров изучаемых течений входят потенциалы Гиббса капли G_d , воздушной среды G_a и принимающей жидкости G_t (индексы отмечают принадлежность), плотности $\rho_{d,a,t}$, кинематическая $\nu_{d,a,t}$ и динамическая $\mu_{d,a,t}$ вязкости; полные σ_d^a , σ_t^a и нормированные на плотность жидкости коэффициенты поверхностного натяжения контактирующих сред $\gamma_d^a = \sigma_d^a/\rho_d$, $\gamma_t^a = \sigma_t^a/\rho_t$ см³/с²; коэффициент диффузии окрашивающей каплю примеси в принимающей жидкости κ_d ; эквивалентный диаметр D ; площадь поверхности S_d , объем V , масса M , высота свободного падения H и скорость капли U в момент первичного контакта; доступная потенциальная поверхностная

энергия (ДППЭ) $E_\sigma = \sigma S_d$, кинетическая энергия $E_k = MU^2/2$, потенциальная энергия в гравитационном поле с ускорением свободного падения g .

Полная энергия падающей сферической капли $E_d = E_p + E_k + E_\sigma$ складывается из потенциальной энергии E_p , экстенсивной кинетической энергии с дифференциалом $dE_k = 0.5\rho U^2 dV$, а также ДППЭ, заключенной в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см объемом $V_\sigma = \delta_\sigma S_d$ и массой $M_\sigma = \rho V_\sigma$.

Время передачи кинетической энергии E_k и импульса $\mathbf{P}_k = M\mathbf{v}$ капли $\Delta t = D/U$, которое определяется ее диаметром D и контактной скоростью U , составляет несколько миллисекунд и на несколько порядков превышает время конверсии ДППЭ $\Delta\tau = \delta_\sigma/U \sim 10^{-8}$ с при уничтожении приповерхностного слоя сливающихся жидкостей толщиной $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см. Быстрые процессы преобразования ДППЭ в другие формы на кольцевой границе области слияния жидкостей играют определяющую роль в формировании тонких струек и генерации капиллярных волн в принимающей жидкости [11, 12, 17, 18].

Отношения физических величин образуют наборы собственных временных и пространственных масштабов, определяющих требования к методике измерений в части выбора размера области наблюдения течений, пространственного и временного разрешения инструментов, а также безразмерных отношений, характеризующих капельные течения [10, 15, 17]. Традиционный набор безразмерных параметров включает числа Рейнольдса $Re_d = UD/\nu_d$, Фруда $Fr_d = U^2/gD$, Вебера $We_d = U^2 D/\gamma_d$, Бонда $Bo = gD^2/\gamma_d$, Онезорге $Oh_d = \nu_d/\sqrt{\gamma_d^a D}$, Шмидта $Sc = \nu_t/\kappa_t^m$. В силу двойственности природы параметров описания свободной поверхности число Вебера является также мерой отношения кинетической и поверхностной энергии капли.

Различия физических свойств контактирующих сред характеризуются безразмерными отношениями, составленными по аналогии с числом Атвуда – относительной разностью

плотностей – $R_\rho = \frac{\rho_t - \rho_d}{\rho_t + \rho_d}$, коэффициентов поверхностного натяжения $R_\sigma = \frac{\sigma_t - \sigma_d}{\sigma_t + \sigma_d}$ и ди-

намических вязкостей $R_\mu = \frac{\mu_t - \mu_d}{\mu_t + \mu_d}$.

Степень выраженности быстрых атомно-молекулярных процессов преобразования ДППЭ и передачи кинетической энергии капли характеризуют отношения компонентов энергии

$R_E = \frac{E_k}{E_\sigma}$ и их плотностей $R_W = \frac{E_k M_\sigma}{E_\sigma M}$. Отношения компонентов энергии в условиях

данных опытов меняются в широких пределах, плотность поверхностной энергии $W_\sigma = \frac{E_\sigma}{V_\sigma}$

– всегда большая величина в силу малости толщины области ее локализации δ_σ .

Большое число безразмерных параметров задачи отражает сложность пространственно-временной картины течений, эволюционирующей под действием нескольких одновременно протекающих процессов. Методика экспериментов и обработки данных разрабатывалась с учетом критерия регистрации крупномасштабных компонентов капельных течений – интрузии, каверны, венца, всплеска, капиллярных волн и разрешения тонких компонентов – первичных брызг, шипов и волокон.

3. Экспериментальная установка

Опыты выполнены на модифицированном Стенде для изучения тонкой структуры быстропротекающих процессов (ТСТ), входящем в состав Уникальной исследовательской установки УИУ «ГФК ИПМех РАН» [20]. Картина течения в бассейне δ , показанном на

рис. 1, регистрировалась видеокамерой Optronis CR 300×2 или фотоаппаратом 1. Область течения освещали два многоточечных светодиодных осветителя 2 и 7 Optronis MultiLED со световым потоком 7700 лм, световолоконный осветитель Schott KL2500LCD 3. Проектор ReyLab Xenos RH-1000 мощностью 1 кВт, не приведенный на фотографии, создает центральное световое пятно. Капли падали из дозатора 4 со сменным капилляром в бассейн 8, заполненный частично дегазированной водопроводной водой или другой принимающей жидкостью. Падающая капля перекрывала световой луч в фотодетекторе 5 и запускала видеокамеру с задержкой регулируемой длительности (временной шаг 1 мкс), задаваемой блоком управления 9. Картина течения наблюдалась на экране 6.

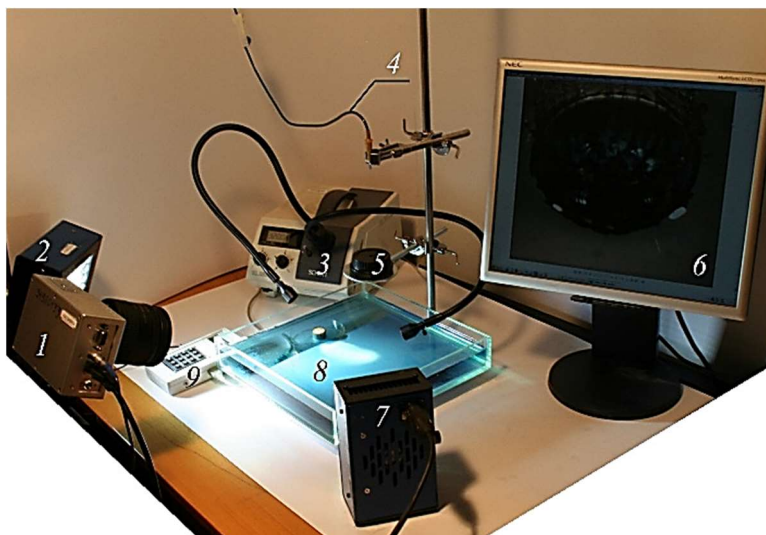


Рис. 1. Экспериментальная установка

Опыты проводились в бассейнах размером $10 \times 10 \times 7 \text{ см}^3$ и $30 \times 30 \times 5 \text{ см}^3$ (показан на рис. 1). При проведении эксперимента внимание уделялось организации светового потока, позволяющего визуализировать тонкую структуру основных элементов течения – каверны, венца, всплеска, капиллярных волн на всех этапах эволюции течения. Перед каждым опытом проводилась регистрация масштабного маркера.

В опытах после настройки аппаратуры натекающая в капилляр капля отрывалась под действием собственного веса и свободно падала в принимающую жидкость. Контактная скорость оценивалась по длительности задержки сигнала с фотоприемника и измерениям положения капли на трех последних кадрах видеопленки, предшествующих контакту и началу втекания в принимающую жидкость.

4. Визуализация переноса вещества упавшей капли

Проведенные опыты показали, что наблюдаемые картины распределения вещества капли в принимающей жидкости разделяются на две группы. Капли, подлетающие к поверхности принимающей жидкости с малой скоростью, когда ДППЭ превышает кинетическую энергию $E_k < E_\sigma$, втекают плавно и образуют в ее толще компактный окрашенный объем [10]. Поверхность жидкости с частично влившейся капли остается выпуклой, каверна начинает формироваться с задержкой в $\Delta t = 10 \div 12 \text{ мс}$.

При слиянии быстро падающих капель, для которых $E_k > E_\sigma$, каверна начинает формироваться с момента первичного контакта. При этом вещество капли распределяется в виде отдельных волокон, образующих линейчатые и сетчатые структуры на поверхности каверны и венца [11]. Степень выраженности отдельных структурных компонентов течений зависит от контактной скорости капли при неизменных значениях остальных влияющих параметров.

5. Визуализация картины течений упавшей капли в интрузивном режиме

Анализ выборки кадров полной видеограммы картины интрузивного течения слияния медленно падающей капли разбавленного раствора чернил с покоящейся принимающей жидкостью, приведенной на рис. 2, показывает, что форма падающей капли, пролетающей после отрыва всего $H = 1$ см, непрерывно изменяется. В данном опыте в момент контакта в форме подлетающей капли высотой $h_d = 4.5$ мм и диаметром $D = 3.7$ мм выражена центральная цилиндрическая часть и два оголовка. Более плавный передний оголовок имеет сферическую форму радиусом $R_d = 1.2$ мм, задний – коническую (рис. 2, $t = -1.75$ мс). Свидетельством интенсивных осцилляций капли служит уплощение верхней и нижней кромок и некоторое сжатие по вертикали за время между кадрами $\Delta t = 3$ мс (рис. 2, $t = 1.25$ мс).

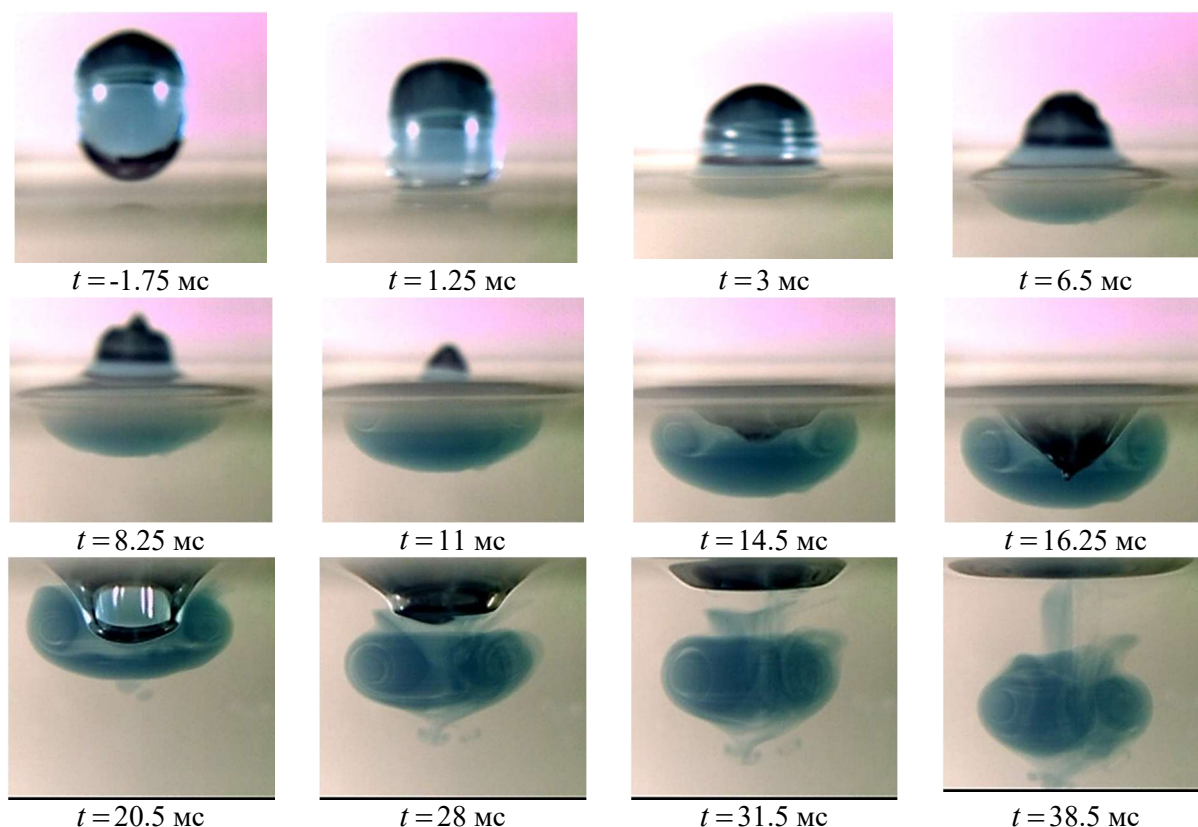


Рис. 2. Эволюция картины импакта капли водного раствора чернил (разбавление 1:200, $\rho = 1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $\sigma = 73 \text{ г} \cdot \text{с}^{-2}$, $\nu = 0.01 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$), сливающейся с водой в боковой проекции ($D = 4.3$ мм, $U = 0.34$ м/с, $E_\sigma = 4$ мкДж, $E_k = 2.24$ мкДж, $Re = 1460$, $Fr = 2.8$, $We = 6.7$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$, $R_E = E_k/E_\sigma = 0.56$, $R_W = 2 \times 10^{-5}$)

Первичный контакт капли, медленно соприкасающейся с жидкостью, происходит плавно без образования разлетающихся брызг и пелены, наблюдающихся в импактном режиме [21].

В интрузивном режиме поверхности контактирующих жидкостей объединяются и образуют единую выпуклую свободную поверхность. Под действием поверхностного натяжения и гравитации капля плавно втекает в принимающую жидкость и образует окрашенную интрузию чечевицеобразной формы диаметром $d_i = 4.37$ мм и высотой $h_i^l = 0.7$ мм со скругленным основанием и конической верхней частью (высотой $h_i^u = 0.4$ мм, рис. 2, $t = 3$ мс). От линии контакта к вершине остатка капли бегут кольцевые капиллярные волны длиной $\lambda_d = 0.7 \div 0.8$ мм и размахом (удвоенной амплитудой) $2A_d = 0.1 \div 0.17$ мм (рис. 2, $t = 6.5$ мс).

Волны и сопутствующие лигаменты [22] заметно искажают форму остатка капли, в верхней части которой появляется конический выступ высотой $h_d'' = 0.5$ мм и диаметром $d_d'' = 0.7$ мм (рис. 2, $t = 8.25$ мс). Диаметр и высота окрашенной интрузии постепенно увеличиваются и при $t = 11$ мс составляют $d_i = 6$ мм и $h_i = 1.9$ мм. Далее остаток капли над свободной поверхностью принимает коническую форму (рис. 2, $t = 11$ мс). Отсутствующая на этом кадре каверна появляется в поле зрения при $t = 13$ мс как темная коническая область в центре течения глубиной $h_c = 1.16$ мм и диаметром $d_c = 1.64$ мм.

Быстро растущая каверна продвигается в толщу жидкости и отодвигает интрузию от свободной поверхности, на которой остается часть жидкости капли (рис. 2, $t = 14.5$ мс). Окрашенная жидкость капли на поверхности формирует пятно переменной толщины. В толще жидкости начинает формироваться вихревое кольцо внешним диаметром $d_r = 6.28$ мм. Вследствие вовлечения принимающей жидкости падает плотность окраски вокруг каверны. Диаметр и глубина каверны быстро растут: $d_c = 4.3$ мм, скорость роста диаметра $dd_c/dt = -0.26$ м/с, глубина мм и $dh_c/dt = 0.4$ м/с (рис. 2, $t = 16.25$ мс), кольцевой вихрь становится более выраженным.

Максимальную глубину $h_c = 2.66$ мм каверна, имеющая коническую форму и скругленное основание, достигает при $t = 20.5$ мс (диаметр $d_c = 5.52$ мм). Далее каверна начинает интенсивно стягиваться к свободной поверхности. Скорость уменьшения высоты достигает $dh_c/dt = -0.2$ м/с.

Продолжающаяся погружение окрашенная интрузия за время $t = 31.5$ мс трансформируется в сферический вихрь, впервые замеченный еще в [2], и детально визуализированный в последующих работах [1, 7–9]. Цилиндрический след за вихрем окружает окрашенная «коническая юбка». Тороидальный вихрь опережает маленькая струйка с вихревым оголовком высотой $h_j = 0.57$ мм, диаметром $d_j = 1.23$ мм.

Наряду с традиционным анализом картины слияния капли в боковой проекции, научный и практический интерес представляет изучение картины капельных течений в горизонтальной плоскости. Обычно регистрируется только форма свободной поверхности, однако в прозрачных средах можно проследить структуру течений и на поверхности, и в толще жидкости. При анализе данных наблюдений следует учитывать эффекты образования каустик, рефракции и дисперсии световых лучей, вызывающих появление областей полного внутреннего отражения, в которых не наблюдаются некоторые элементы течений в толще жидкости.

Выборки из видеограммы картины слияния капли при наблюдении свободной поверхности под углом 30° к вертикали представлены на рис. 3 (условия опытов такие же, как на рис. 2).

В рассматриваемой проекции втекающую каплю, в данном опыте имеющую стандартную каплевидную форму, на свободной поверхности окружает расширяющийся валик, порождающий расходящиеся кольцевые капиллярные волны, число которых последовательно растет (рис. 3, $t = 0.5$ мс). Капля частично вливается в толщу жидкости, где формируется компактная интрузия, частично растекается в тонкое кольцо на свободной поверхности. Выступающий над свободной поверхностью остаток капли при $t = 4$ мс окружает окрашенное кольцо шириной $\Delta r_1 = 5.9$ мм (рис. 3), порождающее группу из трех кольцевых капиллярных волн длиной $\lambda_c = 1.16, 1.04$ и 0.69 мм. На главном диаметре справа у внешней кромки кольца виден газовый пузырек диаметром $d_b = 2.24$ мм.

По мере слияния капли картина распределения окрашенной жидкости усложняется. Однородность окраски теряется, и при $t = 8$ мс внутри просветленного кольца диаметром $d_r = 6.8$ мм и шириной $\Delta r_l = 0.69$ мм появляется более темное кольцо – проекция стенки растущей каверны. Внешний край кольца теряет однородность, на нем возникают зазубрины (рис. 3, $t = 8$ мс).

Под действием сходящихся капиллярных волн и сопутствующих течений [21, 22] вершина остатка капли теряет округлую форму, в ее центральной части появляется конический выступ (рис. 3, $t = 11.75$ мс). Дно каверны начинает быстро проседать, в его центре прослеживается гребень кольцевой капиллярной волны.

Далее вершина остатка капли над быстро движущейся центральной частью поверхности жидкости стягивается в шар (рис. 3, $t = 13.75$ мс), располагающийся над коротким цилиндром. В центре течения развивается растущий аналог стримера (см. рис. 2, $t = 8.25$ мс и рис. 3, $t = 11.75$ мс). Справа в середине кадра появляется бледный треугольник – тень окрашенной втекающей жидкости.

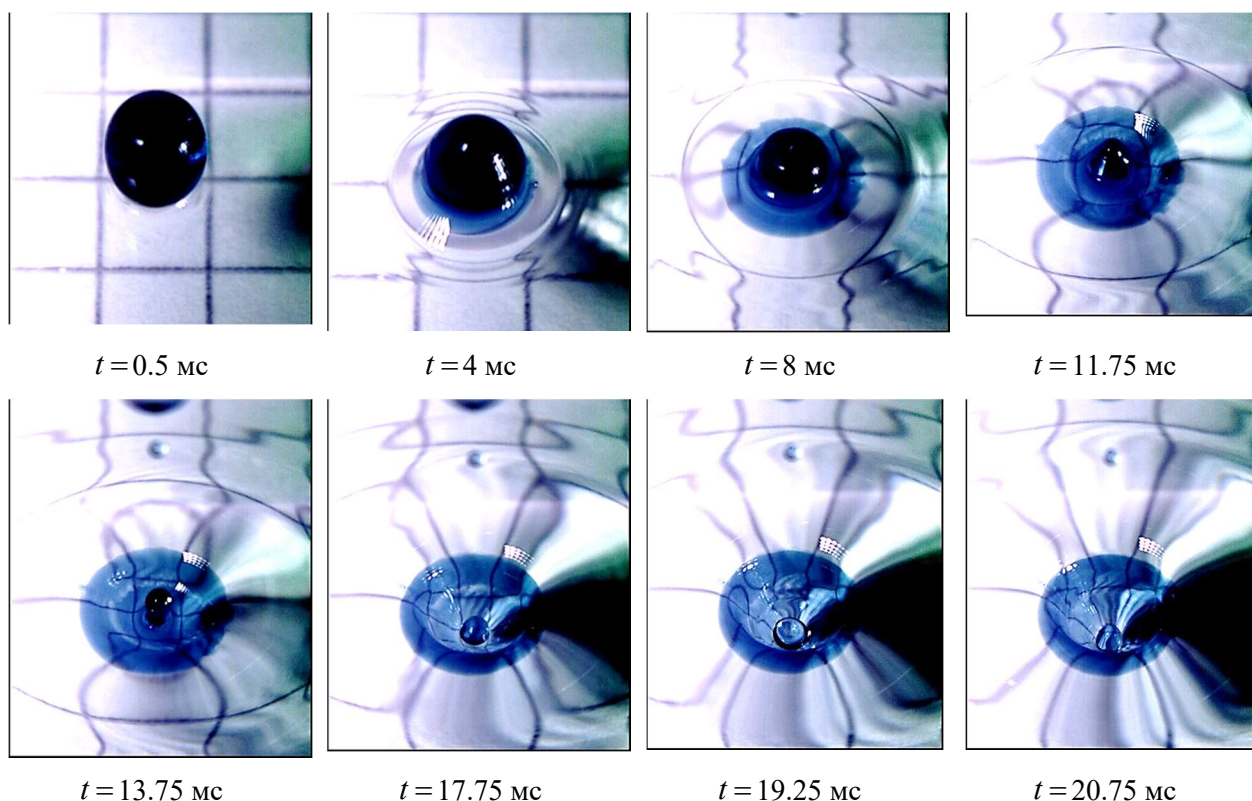


Рис. 3. Картина течения импакта капли водного раствора чернил (разбавление концентрация 1:1000, $D = 4.3$ мм) при наблюдении сверху под углом 60° к горизонту (условия опыта приведены на рис. 2)

Каверна продолжает быстро углубляться, остаток капли втягивается в принимающую жидкость (рис. 3, $t = 17.75$ мс). При повышении скорости втягивания остатка сферическая капля трансформируется в диск диаметром $d_s = 1.6$ мм (рис. 3, $t = 19.25$ мс). По мере роста окрашенной интрузии тень увеличивается, ее окраска становится более плотной. В интервале $19.25 < t < 20.75$ мс погружение остатка капли сменяется резким подъемом центрального цилиндрического столбика – аналога всплеска диаметром $d_s = 1.32$ мм с конической вершиной (рис. 3, $t = 20.75$ мс).

Высота всплеска быстро увеличивается и при $t = 30$ мс с его вершины вертикально вверх выбрасывается капля диаметром $d_v = 1.38$ мм со скоростью около $U_v = 2$ м/с. Одновременно резко перестраивается картина распределения вещества капли на поверхности жидкости, часть кольца стягивается с поверхности на стенки остатка каверны.

Погрузившаяся часть капли трансформируется в вихревое кольцо. Форма и расположение интрузии окрашенной жидкости определяют картину тени, которая из треугольной преобразуется в кольцевую (рис. 4, $t = 39.5$ мс).

Далее наблюдается интересное явление – столкновение движущейся вверх капли диаметром $d_v = 1.38$ мм, выброшенной с вершины всплеска, с сателлитом диаметром $d_s = 0.82$

мм, падающим из области отрыва капли (по измерениям на предыдущем кадре). Капли сближаются и сливаются при $t = 51.5$ мс. Новая объединенная капля диаметром $d_s^v = 1.65$ мм продолжает двигаться вверх и достигает максимальной высоты $H_s = 7.75$ мм, затем ускоренно падает вниз, достигая контактной скорости $U_1 = 0.21$ м/с.

Тень формирующегося кольца быстро растет и перекрывает основное изображение. В следе за погружающимся кольцом в жидкости остаются отдельные наклонные волокна (рис. 4, $t = 77.25$ мс).

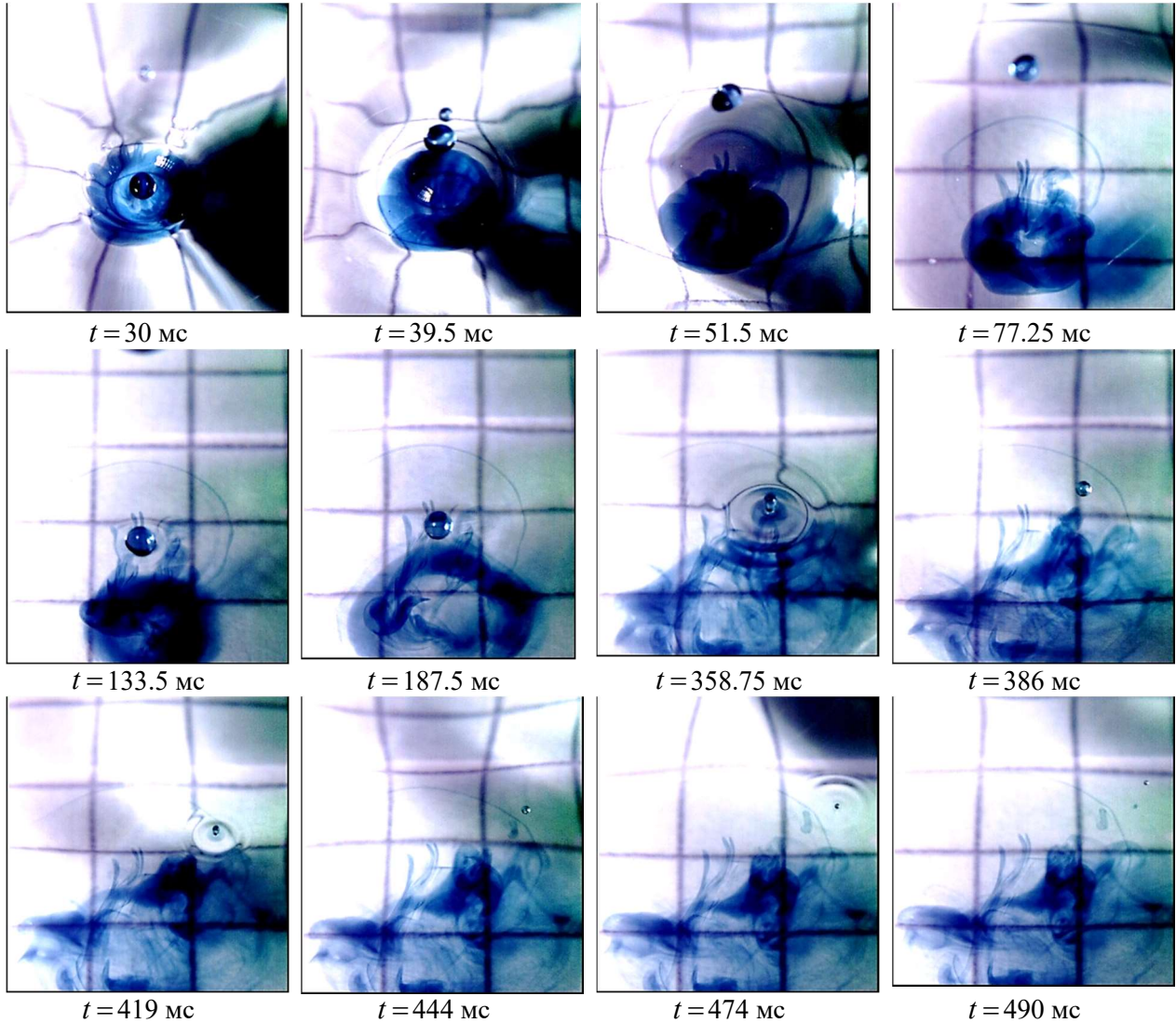


Рис. 4. Последовательность отскоков капли водного раствора чернил (разбавление 1:1000), погружающейся в чистую воду при наблюдении сверху под углом 60° к горизонту ($D = 4.3$ мм, $U = 0.34$ м/с, $E_\sigma = 4$ мкДж, $E_k = 2.24$ мкДж, $Re = 1460$, $Fr = 2.8$, $We = 6.7$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$, $R_E = E_k/E_\sigma = 0.56$, $R_W = 2 \times 10^{-5}$)

При касании свободной поверхности принимающей жидкости возвратившаяся капля образует группу капиллярных волн (рис. 4, $t = 133.5$ мс), останавливается и довольно долго лежит на воздушной прослойке (рис. 4, $t = 187.5$ мс). При этом капля быстро осциллирует и медленно сдвигается вправо.

Образовавшееся в толще жидкости кольцо стягивается сходящимися течениями в сферический вихрь диаметром $d_r = 6.6$ мм (рис. 4, $t = 133.5$ мс), который в ходе дальнейшей эволюции течения вновь разворачивается в быстрорастущий тороидальный вихрь с внешним

диаметром $d_r^o = 9.82$ мм и внутренним диаметром $d_r^i = 2.31$ мм. В следе за вихрем в жидкости остаются окрашенные волокнистые следы.

Когда воздушная прослойка выдавливается, поверхности лежащей капли и принимающей жидкости соприкасаются. При этом часть жидкости капли быстро перетекает в принимающую жидкость, в которой образуется мелкая каверна. Остаток капли трансформируется в короткий всплеск. С вершины всплеска, окруженного группой кольцевых капиллярных волн, вылетает новая капля меньшего диаметра $d_v^2 = 0.75$ мм (потерявшая 90 % объема и массы и 79 % площади свободной поверхности от капли диаметром d_s^v) со скоростью $U_2 = 1.37$ м/с (рис. 4, $t = 358.75$ мс). Слияние происходит неравномерно по окружности контакта, поскольку новая вылетающая капелька при выбросе получает ранее отсутствовавшую горизонтальную компоненту скорости и начинает смещаться по наклонной траектории, достигая высоты $H_v^3 = 2.5$ мм при $t = 386$ мс.

Возвращающаяся капля смещается на расстояние $\Delta x = 1.82$ мм, $\Delta y = 1.05$ мм от точки отскока. Далее картина отскоков уменьшающейся капли повторяется.

При очередном соприкосновении возвращающейся капельки с поверхностью принимающей жидкости образуется новая кольцевая капиллярная волна. Над поверхностью жидкости возвышается новая микроструйка, с вершины которой выбрасывается капля диаметром $d_v^4 = 0.48$ мм (рис. 4, $t = 419$ мс). Достигнув максимальной высоты при $t = 444$ мс, капелька возвращается и вновь касается свободной поверхности на расстоянии $\Delta x = 1.63$ мм, $\Delta y = 1.1$ мм от точки вылета, образуя следующую группу капиллярных волн. При $t = 490$ мс следующая вылетевшая капелька смещается на расстояние $\Delta x = 0.8$ мм от точки образования и покидает поле зрения.

На всех изображениях течения при $t > 358.75$ мс в картине течения выделяются волокнистые структуры – остатки вещества капли. Часть волокон прорисовывают следы конической юбки вокруг цилиндрического следа кольцевого вихря, часть сформировалась в процессе растекания погружающегося вихревого кольца. Волокна медленно расплываются и теряют контрастность под действием остаточных течений в бассейне и процессов молекулярной диффузии.

Изменения геометрических размеров структурных компонентов течений со временем приведены на рис. 5. Глубина погружения нижней кромки чечевицеобразной интрузии, движущейся с постоянной скоростью $u_i = 0.17$ м/с (кривая 1, рис. 5), аппроксимируется линейной зависимостью $h_i(t) = 0.17t$ (размерности величин приведены на рисунке).

Диаметр интрузии растет немонотонно (кривая 2 на рис. 5), на начальном участке аппроксимируется зависимостью $d_i(t) = 2\sqrt{t}$. Каверна появляется в поле зрения с запаздыванием на $\Delta t_c = 13$ мс, ее диаметр (кривая 3, рис. 5) аппроксимируется степенной функцией $d_c = \sqrt{t - 13} + 2.5$. Глубина каверны (кривая 4, рис. 5) линейно увеличивается на начальном участке $h_c = 0.73(t - 13)$. Скорость углубления дна каверны на начальном участке составляет $u_c = 73$ см/с, достигает максимума при $t = 15$ мс и далее немонотонно спадает.

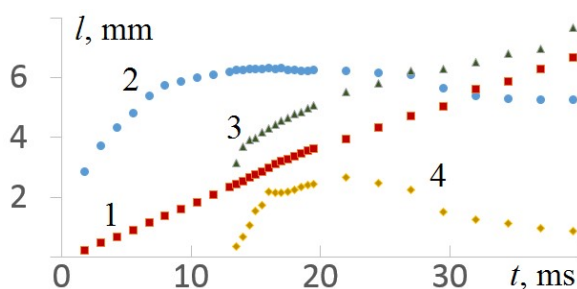


Рис. 5. Эволюция геометрии интрузии и каверны в интрузивном режиме: 1 – глубина погружения нижней кромки интрузии, 2 – диаметр интрузии, 3 – диаметр каверны, 4 – глубина каверны

Площадь поперечного сечения интрузии S_i (рис. 6) вначале растет степенным образом ($S_i = 0.09t^2$), достигает максимума при $t = 19$ мс при максимальной глубине каверны, далее незначительно поджимается и растягивается внутренними течениями и волнами.

Отношение объема интрузии V_i , в предположении осевой симметрии формы, и погружившейся части капли V_d^s при $t_i < 15$ мс квадратично растет со временем (зависимость $R_V = 0.006t^2 + 0.1$), при $t_i > 15$ мс темп падает, достигает максимума $R_V = 1.78$ при $t_i = 22$ мс и далее заметно уменьшается. Рост объема интрузии на начальном этапе связан с вовлечением принимающей жидкости, разделяющей отдельные окрашенные слои в формирующемся вихревом течении. Объем интрузии убывает в процессе сжатия тороидального вихря в сферический, а также вследствие переноса окрашенного вещества в след, окружающую его коническую юбку, и опережающий мелкомасштабный вихрь.

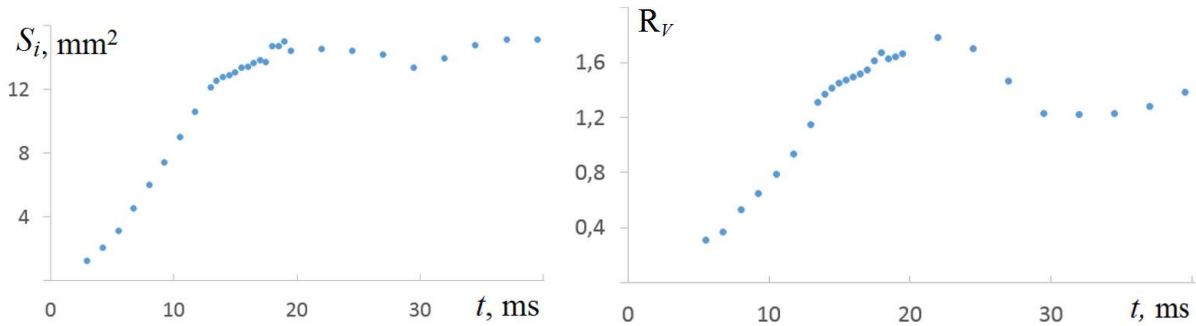


Рис. 6. Изменение площади поперечного сечения интрузии S_i и отношения $R_V = V_i/V_d^s$ объема интрузии V_i к объему погружившейся части капли V_d^s со временем

В неравномерном распределении освещенности выделены радиальные неоднородности, отражающие перенос вещества с поверхности на стенки каверны, и аксиальные выступы на внешней кромке окрашенной области. В интенсивности окраски I на внешней кромке окрашенной области и в его пространственном спектре, представленных на рис. 7, выделены неоднородности с масштабами $\delta l_\varphi = 1.2, 1.5, 2.0, 3.5$ мм.

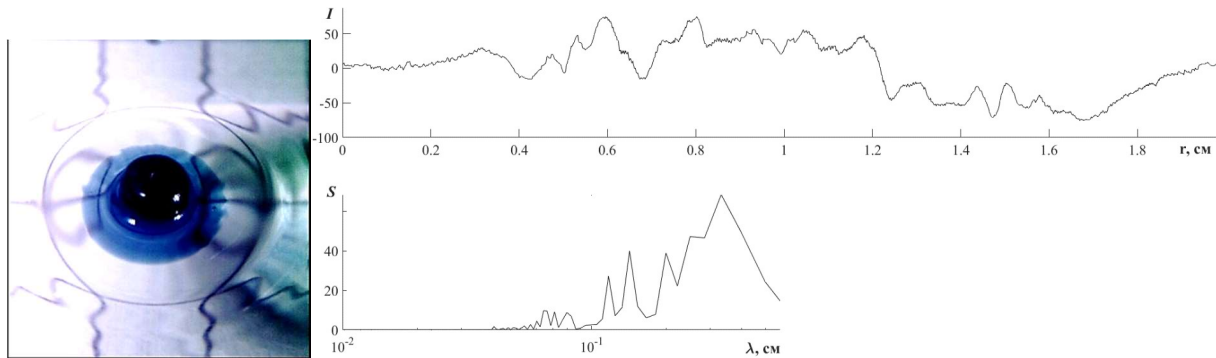


Рис. 7. Распределение освещенности на кромке окрашенной области (рис. 3, $t = 8$ мс) и его пространственный спектр

Высокоразрешающие наблюдения показывают, что отрыву капли предшествует формирование тонкой цилиндрической перемычки, связывающей растущую каплю с маточной жидкостью [23]. Перемычка вначале разрывается около отрывающейся капли, а затем ее остаток отрывается от маточной жидкости и формирует вторичную маленькую каплю – сателлит. Остаток разорвавшейся перемычки быстро втягивается при отрыве и возбуждает различные виды осцилляций капли с характерными собственными частотами. Форма капли активно меняется (наименьшая высота $h_d = 3.24$ мм, наибольшая – $h_d = 4.45$ мм) с частотой $f = 340$ Гц, частота второй моды собственных инфинитезимальных колебаний капли составляет $\omega_R = 370$ Гц [24]. Также капля осциллирует с промежуточной частотой в диапазоне капиллярных волн ($f > 400$ Гц), и с еще более высокими частотами в диапазоне звуковых колебаний. За время

падения, которое от момента разрыва перемычки до касания донной частью капли поверхности принимающей жидкости составляет $t_H = 22$ мс, капля маловязкой жидкости не успеваает принять равновесную форму. Поскольку возмущения формы капли в момент контакта определяется действием неконтролируемых факторов в момент разрыва перемычки, форма подлетающей капли и характер процессов слияния в каждом новом опыте значительно отличаются, что проявляется в закономерностях формирования каверны.

Изменчивость картины течения при малой высоте свободного падения капли иллюстрирует выборка из видеofilма нового опыта, приведенная на рис. 8. При этом картина переноса вещества, форма окрашенной интрузии и характер ее эволюции незначительно отличаются от приведенных на рис. 2.

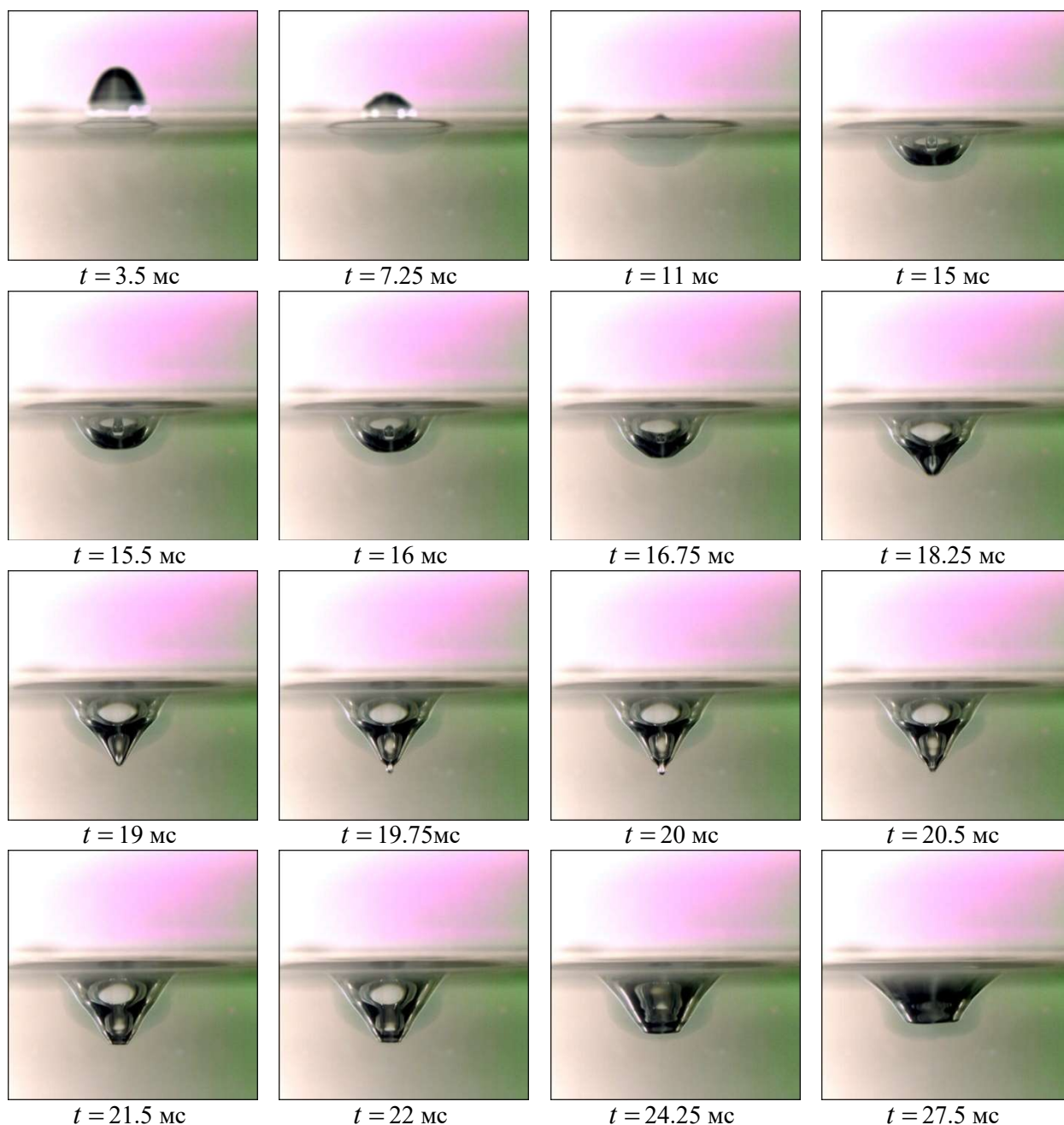


Рис. 8. Эволюция картины импакта в интрузивном режиме. Вид сбоку. Капля водного раствора чернил (концентрация 1:200, $\rho = 1 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, $\sigma = 73 \text{ г} \cdot \text{с}^{-2}$, $\nu = 0.01 \text{ г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$) погружается в воду ($D = 4.3 \text{ мм}$, $U = 0.34 \text{ м/с}$, $E_\sigma = 4 \text{ мкДж}$, $E_k = 2.24 \text{ мкДж}$, $Re = 1460$, $Fr = 2.8$, $We = 6.7$, $Bo = 2.5$, $Oh = 0.0018$, $R_E = E_k/E_\sigma = 0.56$, $R_W = 2 \times 10^{-5}$)

Растекание жидкости в новой выборке на рис. 8 начинается при $t = 3.5$ мс, далее за время $\Delta t = 3.25$ мс успевает сформироваться интрузия чечевицеобразной формы (рис. 8, $t = 7.25$ мс). При этом донная часть втекающей капли уплощается. Далее глубина и диаметр интрузии продолжают увеличиваться, вершина остатка капли заостряется.

Каверна начинает формироваться при $t = 11$ мс, и ее форма быстро меняется. При $t = 15$ мс дно формирующейся каверны уплощенное, в центре каверны виден остаток капли диаметром $d = 0.75$ мм. При $t = 15.5$ мс дно начинает скругляться, диаметр остатка жидкости капли $d = 0.71$ мм, высота $h = 1.15$ мм. Процесс монотонно продолжается, каверна приобретает сферическую форму, остаток капли принимает цилиндрическую форму диаметром $d = 1$ мм (рис. 8, $t = 16$ мс). Выпуклость на дне каверны полностью уходит к $t = 16.75$ мс, когда начинается продавливание центра дна. При этом интрузия, охватывающая каверну, сохраняет свою форму.

Далее формируется центральная воздушная полость (высота $h_c^c = 2.5$ мм, диаметр $d_c^c = 3.85$ мм при $t = 19$ мс), которая быстро растет в интервале $17 < t < 19$ мс. Дополнительная быстрорастущая цилиндрическая полость диаметром $d_c^c = 0.64$ мм формируется в центре конического основания каверны при $t = 19.75$ мс. Здесь каверна состоит из трех частей: верхняя – полусферическая, центральная – коническая и нижняя – цилиндрическая, которая достигает максимальной глубины при $t = 20$ мс. Центральная воздушная полость начинает быстро заполняться при $t = 20.5$ мс, дно каверны приобретает сглаженную форму при $t = 21.5$ мс.

Процесс коллапса каверны протекает неравномерно, вначале уничтожается ее нижняя коническая часть при медленном росте ширины каверны, дно которой принимает скругленную форму $t = 24.25$ мс. Далее дно уплощается, каверна продолжает коллапсировать, дно все более уплощается (рис. 8, $t = 27.5$ мс).

Изменчивость формы каверны иллюстрируют наборы контуров в опытах, выборки из видеogramм которых приведены на рис. 2 и рис. 8. Основные элементы формы дна каверны присутствуют в обеих выборках на рис. 9. Однако в первом опыте узкая цилиндрическая полость в центре дна появляется в самом начале процесса роста каверны, а во втором – в каверне максимальной глубины.

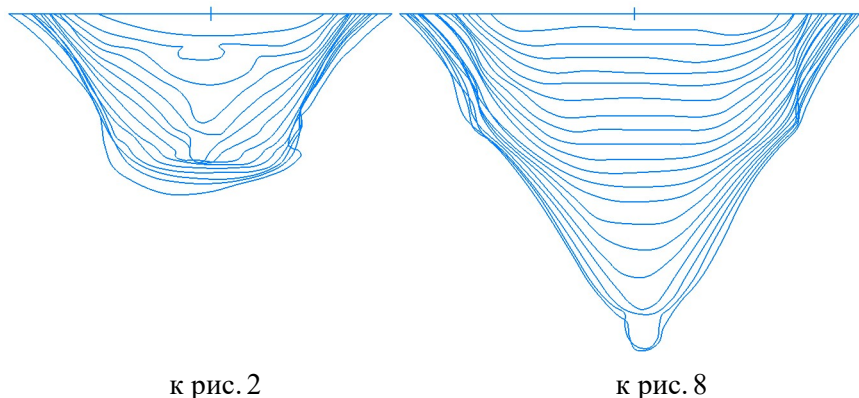


Рис. 9. Временная эволюция контура каверн, приведенных на рис. 2 и 8

В первом случае (рис. 9, левая колонка и рис. 1) на дне каверны формируется воздушная полость диаметром $d_c^c = 0.42$ мм на начальном этапе формирования каверны. Глубина и ширина каверны, как и ее центральные цилиндрические полости, увеличиваются со временем (максимальная глубина $h_c^c = 2.66$ мм при $t = 22$ мс). Далее форма дна каверны резко сглаживается в течение $\Delta t = 1.5$ мс и цилиндрическая полость исчезает. Скорость движения этого участка дна каверны достигает $u_c^c = 0.86$ м/с при скорости движения дна в целом $u_c = 0.3$ м/с.

Каверна во втором эксперименте (рис. 8) растет более энергично, скорость движения дна достигает $u_c = 0.73$ м/с при $t = 16$ мс, когда плоское дно начинает вытягиваться, и за ко-

роткое время в его центре появляется цилиндрическая полость глубиной $h_c^c = 0.5$ мм и диаметром $d_c^c = 0.48$ мм. Дальнейшее рассмотрение показывает, что центральная полость исчезает за время $\Delta t = 0.5$ мс (скорость движения ее дна достигает $u_c^c = 1$ м/с). Таким образом, скорость движения отдельных участков дна неравномерна и различия достигают $\Delta u = 0.5$ м/с, в частности средней скорости дна и максимальной скорости движения его центра.

Из сравнения графиков изменения глубины и диаметра каверн, приведенных на рис. 8 следует, что в обоих случаях каверны формируются с запаздыванием. Диаметры каверн растут практически линейно со временем (кривые 1 и 2, рис. 10). Вертикальный размер в первом случае растет более равномерно на интервале $16 < t < 22$ мс, достигая максимального размера $h_c = 2.7$ мм. Во втором случае наблюдается быстрый рост глубины в интервале $17 < t < 20$ мс. Максимальная глубина $h_c = 5$ мм достигается при $t = 20$ мс.

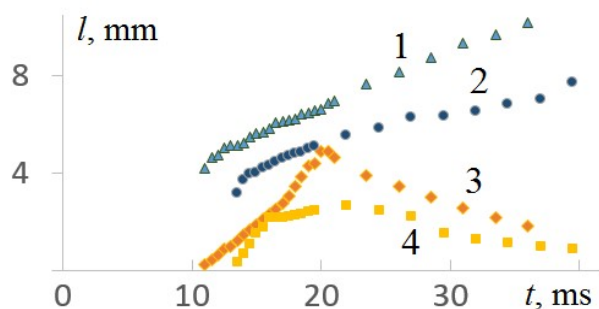


Рис. 10. Изменения размеров каверн со временем: 1, 3 – диаметр и глубина каверны на рис. 8; 2, 4 – диаметр и глубина каверны на рис. 1

Разница диаметров каверн в двух опытах при $t = 13.5$ мс составляет 24 %, а предельные глубины каверн отличаются в 2 раза при $t = 20$ мс, что свидетельствует о действии различных механизмов передачи кинетической, и потенциальной энергии падающей капли. Полная энергия может частично переходить в кинетическую энергию тонких течений в принимающей жидкости и потенциальную энергию деформированной поверхности – смещение и изменение ее площади. Тонкие течения в принимающей жидкости, которые здесь не регистрируются, существуют в дополнение к вихревым течениям, изменяющим форму области распространения вещества капли. С увеличением скорости капли картина течения перестраивается, и каверна начинает формироваться при первичном контакте сливающихся жидкостей [25].

6. Заключение

Доработана методика опытов и впервые проведена согласованная регистрация распределения вещества падающей капли и изменения формы каверны в принимающей жидкости в интрузивном режиме слияния капли.

При малых скоростях контакта, при $E_k < E_\sigma$, вещество капли начинает поступать в толщу жидкости с момента первичного контакта при сохранении выпуклой формы общей свободной поверхности. Каверна – вогнутый участок жидкости с отрицательной кривизной, начинает формироваться с запаздыванием после погружения основной части капли и трансформации ее сферической донной скругленной части в цилиндрический столбик диаметром $d_c^c \sim 0.5$ мм.

Пакеты расходящихся капиллярных волн генерируются движущейся кромкой области слияния. Группы сходящихся капиллярных волн вызывают выраженную деформацию вершины остатка втекающей капли, дна каверны и образование узкой центральной струйки – скрытого в каверне аналога всплеска.

Чечевицеобразные формы интрузии довольно стабильны, а формы каверны изменчивы и включают как традиционные плоские и сферические участки, так и центральные участки цилиндрической формы, движущиеся с различной скоростью.

Отмечаются значительные различия в формах и геометрических параметрах каверн, скоростей движения участков дна в при неизменных условиях опытов. На начальном этапе роста глубины скорости каверн составляют $u_c = 0.73$ и 0.42 м/с, на этапе схлопывания цилиндрических углублений на дне – $u_c^c = 0.86$ и 1 м/с, на этапе заглупления каверн – $u_c = 0.3$ и 0.5 м/с.

Благодарности и ссылки на гранты

Эксперименты проведены на стенде ТБП УИУ «ГФК ИПМех РАН». Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598-П «Гидродинамика и энергетика капли и капельных струй: формирование, движение, распад, взаимодействие с контактной поверхностью», <https://rscf.ru/project/19-19-00598>).

Литература

1. 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. Vol. 29, pp. 417–436. <https://doi.org/10.1098/rspl.1885.0034>
2. Rogers W.B. On the formation of rotating rings by air and liquids under certain conditions of discharge // Amer. J. Sci., Second Ser. 1858. Vol. 26, p. 246–258. <https://biodiversitylibrary.org/page/36868460>
3. Thompson D. W. On growth and forms. Cambridge University Press: Cambridge, UK. 1917. 793 p.
4. Worthington A.M., Cole R.S. Impact with a liquid surface, studied by the aid of instantaneous photography//Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 1897. Vol. 189, pp. 137–148. <https://doi.org/10.1098/rspl.1899.0014>
5. Worthington A.M. A study of splashes. Longmans, Green and Co: London, UK. 1908. 129 p.
6. Edgerton H.E., Killian Jr., J.R. Flash!: Seeing the unseen by ultra high-speed photography. Hale, Cushman and Flint: Boston, USA. 1939. 203 p.
7. Li E. Q., Thoraval M.-J., Marston J. O., Thoroddsen S. T. Early azimuthal instability during drop impact // J. Fluid Mech. 2018. Vol. 848, p. 821–835. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.383>.
8. Okabe J., Inoue S. The Generation of Vortex Ring // Kyushu Univ., Rep. Res. Inst. Appl. Mech. 1960. Vol. 8. iss. 32, p. 91–101.
9. Peck B., Sigurdson L. The three-dimensional vortex structure of an impacting water drop // Phys. of Fluids. 1994. Vol. 6. iss. 2. p. 564–576. <https://doi.org/10.1063/1.868352>
10. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Задержка формирования каверны в интрузивном режиме слияния свободно падающей капли с принимающей жидкостью // Доклады РАН. 2021. Т. 496. С. 34–39. DOI: 10.31857/S268674002101003X.
11. 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. DOI: 10.31857/S2686740021020139
12. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Полосчатые структуры в картине распределения вещества капли по поверхности принимающей жидкости // Доклады РАН. 2018. Т. 481. № 2. С. 145–150. DOI: 10.1134/S1028335818070066.
13. 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>
14. Ersoy N. E., Eslamian M. Capillary surface wave formation and mixing of miscible liquids during droplet impact onto a liquid film//Phys. of Fluids. 2019. Vol. 31. iss. 1, p. 012107. <https://doi.org/10.1063/1.5064640>

15. Chashechkin Y.D. Foundations of engineering mathematics applied for fluid flows // *Axioms*. 2021. Vol.10. iss.4, p.286. <https://doi.org/10.3390/axioms10040286>
16. Feistel R. Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond. *Ocean. Sci.* 2018. Vol. 14. Pp. 471–502. <https://doi.org/10.5194/os-14-471-2018>
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.
18. Дубровин К. А., Зарвин А. Е., Горбачев Ю. Е., Яскин А. С., Каляда В. В. Особенности процесса энергообмена в кластированном потоке аргона при инициации излучения электронным пучком // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-4/articles/1007/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.4.1007>
19. Емельянов В. Н., Тетерина И. В., Волков К. Н. Сопротивление и теплообмен металл-оксидных агломератов в потоке продуктов сгорания твердого топлива // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2020. Т. 21, вып. 1. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-1/articles/893/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.21.1.893>
20. 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>
21. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Множественные выбросы брызг при ударе капли // Доклады РАН. 2020. Т. 494. С. 42–46. DOI: 10.31857/S2686740020050181.
22. Chashechkin Yu. D., Ochirov A.A. Periodic waves and ligaments on the surface of a viscous exponentially stratified fluid in a uniform gravity field // *Axioms*. 2022. Vol. 11(8). p. 402. doi: 10.3390/axioms11080402
23. Чашечкин Ю.Д., Прохоров В.Е. Трансформации перемычки в процессе отрыва капли // Прикладная механика и техническая физика. 2016. № 3. С. 16–31. DOI: 10.15372/PMTF20160303
24. Strutt J.W. (Rayleigh, Lord). On the Capillary Phenomena of jets // *Proceedings of the Royal Society of London* 1879. Vol. 29. Pp. 71–97. <https://doi.org/10.1098/rspl.1879.0015>
25. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Визуализация картины течения импакта свободно падающей капли при генерации звуковых пакетов // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2022. Т. 23, вып. 5. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-5/articles/1011/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.5.1011>

References

1. 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, vol. 29, pp. 417–436. <https://doi.org/10.1098/rspl.1885.0034>
2. Rogers W. B., On the formation of rotating rings by air and liquids under certain conditions of discharge, *Amer. J. Sci., Second Ser.*, 1858, vol. 26, pp. 246–258. <https://biodiversitylibrary.org/page/36868460>
3. Thompson D. W., *On growth and forms*, Cambridge University Press: Cambridge, UK. 1917. 793 p.
4. Worthington A. M., Cole R. S., Impact with a liquid surface, studied by the aid of instantaneous photography, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A.*, 1897, vol. 189, pp. 137–148. <https://doi.org/10.1098/rspl.1899.0014>
5. Worthington A. M., *A study of splashes*, Longmans, Green and Co: London, UK, 1908, 129 p.
6. Edgerton H. E., Killian Jr., J. R., *Flash!: Seeing the unseen by ultra high-speed photography*, Hale, Cushman and Flint: Boston, USA, 1939, 203 p.
7. Li E. Q., Thoraval M.-J., Marston J. O., Thoroddsen S. T., Early azimuthal instability during drop impact, *J. Fluid Mech.*, 2018, vol. 848, pp. 821–835. <https://doi.org/10.1017/jfm.2018.383>
8. Okabe J., Inoue S., The Generation of Vortex Ring, *Kyushu Univ., Rep. Res. Inst. Appl. Mech.*, 1960, vol. 8, no. 32, pp. 91–101.

9. Peck B., Sigurdson L. The three-dimensional vortex structure of an impacting water drop, *Phys. of Fluids*, 1994, vol. 6, no. 2, pp. 564–576. <https://doi.org/10.1063/1.868352>
10. Chashechkin Y. D., Ilinykh A. Y., The delay in cavity formation in the intrusive mode of coalescence of a freely falling drop with a target liquid, *Doklady Physics*, 2021, vol. 66, no. 1, pp. 20–25. DOI: 10.1134/s102833582101002x
11. Chashechkin Y. D., Ilinykh A. Y., Drop decay into individual fibers at the boundary of the contact area with the target fluid, *Doklady Physics*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 101–105. DOI: 10.1134/S1028335821040078
12. Chashechkin Y. D., Ilinykh A. Y., Banded structures in the distribution pattern of a drop over the surface of the target fluid, *Doklady Physics*, 2018, vol. 63, no. 7, pp. 282–287. DOI: 10.1134/S1028335818070066.
13. Chashechkin Y. D., Evolution of the fine structure of the matter distribution of a free-falling droplet in mixing liquids, *Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 285–294. DOI: 10.1134/S0001433819020026.
14. Ersoy N. E., Eslamian M., Capillary surface wave formation and mixing of miscible liquids during droplet impact onto a liquid film, *Phys. of Fluids*, 2019, vol. 31, no. 1, p. 012107. <https://doi.org/10.1063/1.5064640>
15. 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>
16. Feistel R., Thermodynamic properties of seawater, ice and humid air: TEOS-10, before and beyond, *Ocean. Sci.*, 2018, vol. 14, pp. 471–502. <https://doi.org/10.5194/os-14-471-2018>
17. Landau L. D., Lifshitz E. M., *Course of Theoretical Physics, Vol. 6: Fluid Mechanics*, Nauka, Moscow, 1986; Pergamon, New York, 1987.
18. Dubrovin K. A., Zarvin A. E., Gorbachev Yu. E., Yaskin A. S., Kalyada V. V., Features of the energy exchange process in a clustered argon stream at the initiation of radiation by an electron beam, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, no. 4 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-4/articles/1007/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.4.1007>
19. Emelyanov V. N., Teterina I. V., Volkov K. N., Drag and heat transfer of metal and oxide agglomerates in flow of combustion products of solid propellant, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2020, vol. 21, no. 1 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2020-21-1/articles/893/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.21.1.893>
20. GFK IPMech RAS: Hydrophysical Complex for Modeling Hydrodynamic Processes in the Environment and their Impact on Underwater Technical Objects, as well as the Spread of Impurities in the Ocean and Atmosphere. <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>
21. Chashechkin Yu. D., Ilinykh A. Y., Multiple emissions of splashes upon drop impact, *Doklady Physics*, 2020, vol. 65, no. 10, pp. 366–370. DOI: 10.1134/s1028335820100067
22. Chashechkin Yu. D., Ochirov A. A., Periodic waves and ligaments on the surface of a viscous exponentially stratified fluid in a uniform gravity field, *Axioms*, 2022, vol. 11, no. 8, p. 402. doi: 10.3390/axioms11080402
23. Chashechkin Y. D., Prokhorov V. E., Transformation of the bridge during drop separation, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2016, vol. 57, no. 3, pp. 402–415. DOI: 10.1134/S0021894416030032
24. Strutt J. W. (Rayleigh, Lord). On the Capillary Phenomena of jets, *Proceedings of the Royal Society of London*, 1879, vol. 29, pp. 71–97. <https://doi.org/10.1098/rspl.1879.0015>
25. Chashechkin Y. D., Prokhorov V. E., Visualization of the flow pattern of the impact of a freely falling drop during the generation of sound packets, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, no. 5 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2022-23-5/articles/1011/>. <http://doi.org/10.33257/PhChGD.23.5.1011>

Статья поступила в редакцию 8 декабря 2022 г.