———— ФИЗИКА ——

УДК 532.5

## РАСПАД КАПЛИ НА ОТДЕЛЬНЫЕ ВОЛОКНА НА ГРАНИЦЕ ОБЛАСТИ КОНТАКТА С ПРИНИМАЮЩЕЙ ЖИДКОСТЬЮ

© 2021 г. Ю. Д. Чашечкин<sup>1,\*</sup>, А. Ю. Ильиных<sup>1,\*\*</sup>

Представлено академиком РАН Д.М. Климовым 11.02.2021 г. Поступило 15.02.2021 г. После доработки 15.03.2021 г. Принято к публикации 16.03.2021 г.

Впервые наблюдался процесс распада на волокна свободно падающей в воду капли (вода, насыщенный раствор железного купороса, ализариновые чернила) в окрестности линии слияния жидкостей. Проведена фото- и видеорегистрация эволюции картины течения. На дне каверны также визуализированы кольцевые капиллярные волны, охватывающие область слияния. Прослежены переносящие вещество капли тонкие радиальные струйки (лигаменты), сходящие с заостренных гребней возмущенной границы области слияния жидкостей. В режиме образования всплеска лигаменты продолжаются в венце, пронизывают пелену и частично проникают в шипы на вершинах заостренных зубцов на ее кромке. Следы окрашенных веществом капли струек образуют линейчатые и сетчатые структуры, деформируемые течениями и расплывающиеся под действием диффузии. Брызги последовательности растущих мелких капелек – вылетают с вершин шипов, размеры и угловое положение которых меняются со временем. Дополнительное ускорение жидкости в струйках связано с конверсией доступной потенциальной энергии при уничтожении свободных поверхностей сливающихся жидкостей.

*Ключевые слова:* капля, брызги, пелена, шипы, всплеск, струйки **DOI:** 10.31857/S2686740021020139

Наблюдения вихрей и капель [1, 2], фотографии каверн, корон, капиллярных волн [3], сопровождающих слияние быстрой капли с жидкостью, проводимые с середины XIX века, стимулировали теоретические исследования течений в рамках теории устойчивости [4], уравнений идеальной и вязкой жидкости [5]. Первоначально изучались крупные компоненты течений [6], последующее совершенствование осветительной техники (используется электромагнитное излучение в диапазоне от рентгеновского до инфракрасного [7]) и регистрирующей аппаратуры позволило выделить тонкий диск - пелену в области первичного контакта, и плоское кольцо (ламеллу), вылетающее с кромки венца к центру течения [7]. С оголовков тонких струек (шипов) на выступах кромки пелены и зубцов венца вылетают последовательности мелких капелек (брызг) [8].

Капельки, вылетающие с шипов, ориентированных наружу, выбивают субмикронные брызги с поверхности жидкости [9], а с шипов, направленных внутрь венца, попадают на каплю [10]. В опытах выделены два основных режима слияния втекания (интрузивный), в котором капля проникает в толщу принимающей среды, и растекания, когда вещество капли остается в тонком слое на поверхности жидкости [11]. При этом капля делится на отдельные волокна [12] (в расчетах вещество капли покрывает все дно каверны [13]). Волокнистые структуры сохраняются в принимающей жидкости и в фазе активной эволюции течения [14], и на более позднем этапе формирования вихревых колец [1, 3].

Наряду с логикой научного исследования, изучение переноса вещества необходимо для оптимизации химических и биохимических технологий, изучения обмена биоматериалами, в том числе патогенными, между атмосферой и гидросферой. Интерес представляет локализация области распада капли на отдельные волокна, определение механизмов процесса. В данной работе впервые представлены результаты визуализации течения в окрестности движущейся кольцевой границы области слияния капли с принимающей жидкостью.

Основу методики эксперимента составляет система фундаментальных уравнений механики жидкостей [5], в которой учитываются все компо-

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>\*</sup>E-mail: chakin@ipmnet.ru

<sup>\*\*</sup>E-mail: ilynykh@ipmnet.ru



**Puc. 1.** Boda (*U* = 3.7 M/c,  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma = 73$  г/с<sup>2</sup>,  $\mu = 0.01$  г/(см · c),  $E_{\sigma} = 4$  мкДж,  $E_k = 266$  мкДж,  $E_k/E_{\sigma} = 66.5$ ,  $W_k/W_{\sigma} = 2.4 \times 10^{-3}$ , Re = 15900, Fr = = 325, Bo = 2.5, Oh = 0.0018, We = 810).

Обозначения (здесь и на рис. 2): 1 – капля, 2 – вершина венца с зубцами, 3 – след удара капельки на поверхности капли, 4 – граница области слияния жидкостей, 5 – кольцевые капиллярные волны на дне каверны, охватывающие область слияния, 6 – дно каверны, 7 – граница каверны и венца, 8, 9 – стенка и верхняя кромка венца, 10 – пелена, 11 – шипы, 12 – капли (брызги), 13 – струйки (лигаменты) на дне каверны, 14 – 3D-текстура стенки венца, 15 – зубцы на кромке венца. Длина метки – 1 см.

ненты энергии капли – и кинетическая  $E_d = \frac{MU^2}{2}$ , и поверхностная  $E_{\sigma} = \sigma S_d$ , сосредоточенная в тонком шаровом слое толщиной  $\delta_c \sim 10^{-6}$  см [14]. Входящие в уравнения величины: плотности воздуха  $\rho_a$  и воды  $\rho_d$  (далее  $\rho_{a,d}$ ); кинематические  $v_{a,d}$ и динамические  $\mu_{a,d}$  вязкости сред; полный  $\sigma_d^a$  и нормированный коэффициент поверхностного натяжения  $\gamma = \frac{\sigma_d^a}{\rho_d}$  см<sup>3</sup>/c<sup>2</sup>; ускорение свободного падения g; диаметр D, площадь поверхности  $S_d$ , объем V, масса M, скорость капли U в момент контакта, длительность ее полного слияния  $\tau_D = D/U \sim$  $\sim 10^{-3}$  с. Их отношения задают характеристические безразмерные параметры – числа Рейнольдса Re  $= \frac{UD}{v}$ ; Фруда Fr  $= \frac{U^2}{gD}$ ; Бонда Bo  $= \frac{gD^2}{\gamma}$ ; Онезорre Oh  $= \frac{v}{\sqrt{\gamma D}}$ ; Вебера We  $= \frac{U^2 D}{\gamma}$ . В условиях опытов

(режиме образования всплеска), время преобразования доступной потенциальной энергии, определяемое длительностью уничтожения приповерхностных слоев  $\tau_c \sim \frac{\delta_{\sigma}}{U} \approx 10^{-8}$  с, меньше продолжительности слияния капли  $\tau_D = \frac{D}{U} \sim 10^{-3}$  с.

Опыты выполнены на стенде ТБП, входящем в Уникальную исследовательскую установку ГФК ИПМех РАН с бассейнами размерами 30 × 30 × 5 см и  $10 \times 10 \times 7$  см, которые заполнялись частично дегазированной водопроводной водой [15]. Отлельные капли свободно падали из дозатора. Картина течения освешалась прожекторами RevLab Xenos RH-1000 или светодиодными источниками Optronis MultiLED и регистрировалась видеокамерой Optronis CR 300 × 2 или фотоаппаратом Canon EOS 350D, которые запускались сигналом с фотоприемника, регистрирующим пролет капли (подробнее методика приведена в [12, 14]). Для визуализации тонких структур в прозрачных жидкостях обеспечивалось равномерное освещение области наблюдения.

Фотографии картин течения иллюстрируют сложную текстуру поверхности дна каверны и венца в процессе слияния с водой прозрачных жидкостей — капли воды (рис. 1) или желтоватого концентрированного водного раствора железного купороса (рис. 2). Линия контакта 4 растекающейся капли 1 не является гладкой и состоит из пологих впадин и заостренных гребней. Поверхность стенки каверны искажена узкими радиальными струйками 13 (лигаментами) и расходящимися кольцевыми капиллярными волнами 5 длиной  $\lambda = 0.03$  см, которые излучает движущаяся линия 4.

Минимальная ширина лигаментов  $\Delta w \approx 0.012$  см наблюдается вблизи источников — вершин гребней контура области контакта, с удалением от которых она монотонно растет (рис. 2). Малые кольцевые структуры *3* на поверхности капли *1* (рис. 1, 2) — следы упавших капелек, вылетевших с кончиков шипов *11* [10]. Отдельные участки пелены *10*, примыкающей к внутренней стенке венца *2*, наклонены к центру (на рис. 2 — на 4 и 7 часов), основная часть — наружу (рис. 1). Соответственно, и шипы *11* в основном направлены наружу, как и капельки *12* (брызги), вылетающие с их вершин [8].

Рассмотрение видеофильмов показывает, что тонкие быстрые струйки 13, образующие линейчатые структуры на дне каверны 6 (рис. 2), выходят с гребней линии контакта 4, проходят границу течений 7, формируют линейчатую текстуру 13 стенки венца 8, пронизывают пелену 10 и выступают в форме шипов 11. Картину течения усложняют неоднородности 14 — трехмерные капиллярные волны, бегущие с верхней кромки венца 2 на дно каверны 6.



Рис. 2. Насыщенный раствор железного купороса  $(U = 3.5 \text{ м/с}, \rho = 1.18 \text{ г/см}^3, \sigma = 75 \text{ г/c}^2, \mu = 0.02 \text{ г/(см} \cdot \text{c}), E_{\sigma} = 4.2 \text{ мкДж}, E_k = 313 \text{ мкДж}, E_k/E_{\sigma} = 75.4, W_k/W_{\sigma} = 2.7 \times 10^{-3}, \text{Re} = 9100, \text{Fr} = 300, \text{Bo} = 2.85, \text{Oh} = 0.0032, \text{We} = 860).$ 

Отмеченные структурные компоненты прослеживаются и в картине растекания капли разбавленного раствора чернил (рис. 3). В фазе роста области контакта жидкостей видны окрашенные брызги и пелена с заостренными зубцами, оконтуренная более плотно окрашенной кромкой (рис. 3, t = 0.25 мс). В темном кольце (тени капли) тонкие волокна видны более четко.

Линейчатая структура течения с тонкими волокнами сохраняется на периферии пелены (естественная визуализация на "лунной дорожке" от источника в направлении на 4 часа (рис. 3. t = 0.75 мс). На границе области слияния выражены заостренные гребни, с вершин которых на дно каверны вылетают парные волокна растуших петель. Нал пологими впалинами лно окрашено более равномерно. Наблюдения видеофильмов показывают, что скорость жидкости в окрашенных струйках больше, чем в прозрачных прослойках. Струйки проходят венец, пелену и выступают тонкими шипами с ее кромки. Отдельные окрашенные порции попадают в шипы и вылетающие капельки, скорость которых превышает контактную скорость капли. При стягивании пятна контакта полосчатые структуры сменяются сетками, составленными из трех- (преимущественно), четырех- и пятисторонних ячеек [12]. На стадии коллапса каверны практически вся поверхность каверны и венца, за исключением его верхней части, покрыта "трехмерным узором" с выраженными кольцевыми границами (t = 16.5 мс).



**Рис. 3.** Слияние капли водного раствора ализариновых чернил: D = 0.42 см, U = 3.5 м/с,  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $\sigma = 73$  г/с<sup>2</sup>,  $\mu = 0.01$  г/(см · с),  $E_{\sigma} = 4$  мкДж, 238 мкДж,  $E_k/E_{\sigma} = 60$ ,  $W_k/W_{\sigma} = 2.1 \times 10^{-3}$ , Re = 15000, Fr = 290, Bo = 2.5, Oh = 0.0018, We = 730, длина метки – 1 см.



**Рис. 4.** Азимутальное распределение освещенности *I* на каверне и венце вдоль соосной с каплей окружности радиуса *R* и значения длин для выраженных спектральных пиков.

Изменения поперечных масштабов полосчатых структур на фотографиях (рис. 3) иллюстрируют азимутальные зависимости освещенности Iвдоль соосной с каплей окружности радиусом R(рис. 4). Линии сканирования выбраны симметрично относительно вертикальной оси, дуги спрямлены с учетом угла наклона линии визирования (в данных опытах – 70°).

Со временем все элементы структуры, в которой выражены и мелкомасштабные возмущения, и разделенные крупные пики, сглаживаются. Энергетические спектры распределений имеют линейчатый характер (значения пяти масштабов  $\delta_d$  для наиболее выраженных пиков приведены под каждым графиком). Со временем тонкие возмущения исчезают, увеличиваются и расстояния между крупными пиками. Изменения отражают рост области течения, перенос вещества в струйках из центра на периферию и диффузионное расплывание волокон. Однако, вследствие вытягивания струек, волокна остаются тонкими продолжительное время.

Появление быстрых струек в области слияния жидкостей связано с сохранением возмущений, возникающих при конверсии доступной потенциальной поверхностной энергии, выделяющейся при слиянии жидкостей, на границе движущейся кольцевой области [14]. Поддержание струек обусловлено падением давления в отдельных участках области слияния около ускоряющегося течения, которое служит аттрактором в течение всего процесса погружения головной части капли. Смена линейчатых структур на сетчатые происходит при погружении донной части капли, когда контактная линия начинает стягиваться и одновременно с уничтожением свободной поверхности капли формируется новая свободная поверхность принимающей жидкости.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Опыты проведены на стендах УИУ "ГФК ИПМех РАН". Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 19-19-00598).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Rogers W.B. On the formation of rotating rings by air and liquids under certain conditions of discharge // Am. J Sci. Arts. Second Ser. 1858. V. 26. P. 246–258.
- Rayleigh L. The influence of electricity on colliding water droops // Proc. R Soc. L. Ser. A. 1879. V. 28. P. 406–409.
- Worthington A.M. A Study of Splashes. London: Longmans, Green. 1908. P. 129.
- 4. Стретт Дж. В. (лорд Рэлей). Теория звука. 2-е изд. М.: ГТТИ, 1955. 980 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Теоретическая физика. Т. VI. М.: Наука. Гл. ред. физмат. лит., 1986. 736 с.
- *Rein M.* Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces // Fluid Dynamics Research. 1993. V. 12. P. 61–93. https://doi.org/10.1016/0169-5983(93)90106-K

- 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
- 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
- Thoroddsen S.T., Thoraval M.J., Takehara, K., Etoh, T.G. Droplet splashing by a slingshot mechanism // Physical Review Letters. 2011. V. 106 (3). 034501. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.106.034501
- 10. 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
- 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.

- 12. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. Полосчатые структуры в картине распределения вещества капли по поверхности принимающей жидкости // ДАН. 2018. Т. 481. № 2. С. 145–150. https://doi.org/10.31857/S086956520001192-4
- Berberovic E., van Hinsberg N.P., Jakirlic S., Roisman I.V., Tropea C. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution // Phys. Rev. 2009. V. E79. 036306. P. 1–15. https://doi.org/10.1103/PhysRevE.79.036306
- 14. Чашечкин Ю.Д. Эволюция тонкоструктурного распределение вещества свободно падающей капли в смешивающихся жидкостях // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 66–74. https://doi.org/10.31857/S0002-351555367-77
- 15. 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: http://www.ipmnet.ru/uniqequip/gfk/#equip.

# DROP DECAY INTO INDIVIDUAL FIBERS AT THE BOUNDARY OF THE CONTACT AREA WITH THE TARGET FLUID

## Yu. D. Chashechkin<sup>a</sup> and A. Yu. Ilinykh<sup>a</sup>

<sup>a</sup> 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 disintegration into fibers of a drop freely falling into water (water, a saturated solution of ferrous sulfate, alizarin ink) was observed in the vicinity of the line of the confluence of liquids for the first time. Photo and video recording of the evolution of the flow pattern was carried out. At the bottom of the cavity, annular capillary waves, covering the confluence area, are visualized as well. Thin radial jets (ligaments) transporting droplet matter, descending from the pointed crests of the perturbed boundary of the fluid confluence region, are traced. In the mode of formation of a splash, the ligaments continue in the crown, penetrate the veil and partially penetrate the spikes at the tops of the pointed teeth on its edge. Wakes of the drop substance-colored jets form linearly and reticulated structures, deformed by flows and spreading out under the influence impact of diffusion. Sprays that are sequences of gradually growing small droplets – fly out from the tips of spikes, the size and angular position of which change over time. Additional acceleration of the fluid in the jets is associated with the conversion of the available potential energy upon the elimination of the free surfaces of the coalescent fluids.

Keywords: drop, spray, lamella, spikes, splash, fine jets