

УДК 532.6

МНОЖЕСТВЕННЫЕ ВЫБРОСЫ БРЫЗГ ПРИ УДАРЕ КАПЛИ

© 2020 г. Ю. Д. Чашечкин^{1,*}, А. Ю. Ильиных^{1,**}

Представлено академиком РАН Д.М. Климовым 13.08.2020 г.

Поступило 14.08.2020 г.

После доработки 14.08.2020 г.

Принято к публикации 16.08.2020 г.

Впервые проведена фото- и видеорегистрация всех групп мелких капелек (брызг), вылетающих при падении в бассейн с водой капли диаметром $0,2 < D < 0,5$ см и скоростью $1 < U < 4,05$ м/с. В режиме образования всплеска группы капелек выбрасываются эшелонами вначале с вершин шипов на пелене вокруг области первичного контакта, затем с шипов на кромках расщепленных оболочек венца и, наконец, с зубцов его шеврона. Первые брызги летят радиально, последующие – внутрь, вокруг каверны и вертикально вверх. Со временем размеры брызг растут от 0,1 до 1,0 мм, их скорости падают с 20 до 1 м/с, интервалы между группами увеличиваются от 50 мкс до 2,5 мс вплоть до начала сглаживания зубцов венца ($t \approx 17$ мс). Ускорению капелек способствует конверсия доступной потенциальной энергии при уничтожении свободных поверхностей сливающихся жидкостей.

Ключевые слова: капля, брызги, пелена, шипы, всплеск, струйки

DOI: 10.31857/S2686740020050181

Вылетающие в воздух брызги при падении капли в жидкость играют важную роль в природе и технологиях. “Центры конденсации” – остатки морских капелек, вынесенные струями воздуха в верхние слои атмосферы, влияют на образование облаков, локальную погоду и климат [1]. Вместе с брызгами в атмосферу попадают вирусы и бактерии [2]. Капли дождя и крупные сгустки воды, образующиеся при их слиянии, смачивают почву, частицы которой захватываются вылетающими брызгами, выносящими в воздух почвенные патогены [3]. Капельные системы применяются для охлаждения различных устройств, от микросхем в наземных условиях [4] до энергетических установок в космосе [5], долговечность работы которых зависит от числа брызг, вызывающих потерю хладагента.

В исследованиях, которые начались в XIX веке с появлением искровых осветителей [6], кроме брызг были замечены пелена – плоская струйка, вылетающая из области слияния жидкостей, еще одна обратная кольцевая струйка на кромке венца [7] и летящие внутрь капельки [8]. Вещество капли распределено по поверхности жидкости в

волокнах [9], на формирование которых влияет быстрая конверсия доступной потенциальной поверхностной энергии при слиянии жидкостей [10]. Практический интерес представляет определение геометрии поля брызг и длительности процесса их выброса. В данной работе впервые прослежена смена источников брызг при слиянии падающей капли с жидкостью в режиме генерации всплеска [8].

Опыты выполнены на стендах “ГФК ИПМех РАН” [11] с бассейнами размерами $30 \times 30 \times 5$ см, $10 \times 10 \times 7$ см и $150 \times 40 \times 60$ см с водопроводной водой [11], в которые свободно падали капли. Картина течения освещалась прожекторами Reu-Lab Xenos RH-1000 или светодиодными источниками Optronis MultiLED и регистрировалась видеокамерой Optronis CR 300×2 или фотоаппаратом Canon EOS 350D, которые запускались фотоприемником, регистрирующим пролет капли (методика приведена в [8–10]).

Параметры задачи – плотности воздуха ρ_a и воды ρ_d (далее $\rho_{a,d}$); кинематическая $\nu_{a,d}$ и динамическая $\mu_{a,d}$ вязкости сред; полный σ_d^a и нормированный коэффициент поверхностного натяжения $\gamma = \frac{\sigma_d^a}{\rho_d}$ см³/с²; ускорение свободного падения g ,

диаметр D , площадь поверхности S_d , объем V , масса M , скорость капли U в момент контакта и

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

*E-mail: chakin@ipmnet.ru

**E-mail: ilynykh@ipmnet.ru

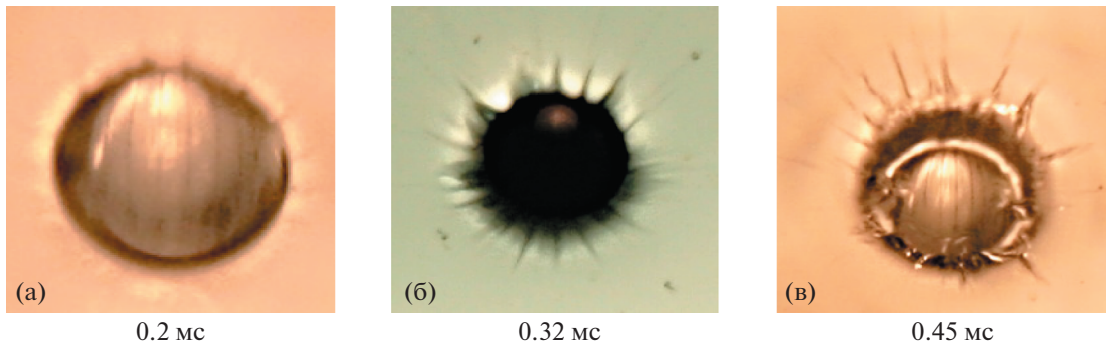


Рис. 1. Пелена и брызги первичного контакта капли с жидкостью ($D = 0.27$ см, $U = 2.9$ м/с, $Re = 7800$, $We = 314$, $Fr = 318$, $Bo = 1$, $Oh = 0.0023$).

длительность слияния $\tau_D = \frac{D}{U} \sim 10^{-3}$ с; доступная потенциальная поверхностная энергия $E_\sigma = \sigma S_d$, сосредоточенная в приповерхностном шаровом слое толщиной порядка размера молекулярного кластера $\delta_\sigma \sim 10^{-6}$ см, и кинетическая энергия $E_d = \frac{MU^2}{2}$. Характерное время преобразования доступной потенциальной энергии в другие формы определяется длительностью слияния приповерхностных слоев $\tau_c \sim \frac{\delta_\sigma}{U} \approx 10^{-8}$ с.

В данной серии опытов капли воды или водного раствора ализариновых чернил диаметром $0.2 < D < 0.5$ см падали с высоты $5 < H < 84$ см и касались поверхности воды в бассейне со скоростью $1 < U < 4.05$ м/с. Параметры опытов: число Рейнольдса $2000 < Re = \frac{UD}{\nu} < 20\,200$; число Фруда $20 < Fr = \frac{U^2}{gD} < 836$; число Бонда $0.54 < Bo = \frac{gD^2}{\gamma} < 3.38$; число Онезорге $0.0017 < Oh = \frac{\nu}{\sqrt{\gamma D}} < 0.0026$; число Вебера $28 < We = \frac{U^2 D}{\gamma} < 1100$. Рассмотрены течения в режиме формирования всплеска.

Соприкосновение капли с жидкостью сопровождается вылетом пелены с тонкими струйками (шипами) и брызг с их вершин (на рис. 1а, $t = 0.2$ мс, видны пять шипов длиной $l_s = 0.4$ мм и толщиной $d_s = 0.05$ мм в диапазоне углов от “2 до 4 часов”). Следы пелены шириной $\Delta r_e = 0.14$ мм видны у основания струек (как и в [7] в опытах с маслом). Первые быстрые мелкие капельки диаметром $d_b^1 = 0.03$ мм, летящие со скоростью $u_r \sim 10$ м/с, опережают основную группу ($d_b^2 = 0.1$ мм) на $\Delta r =$

$= 0.3-5.5$ мм. Синхронно вылетающие в радиальных направлениях капельки собраны в разделенных кольцевых слоях. Группы капелек последовательно вылетают с интервалом $\Delta t \sim 0.05$ мс.

При слиянии с водой капли раствора чернил на фоне пелены ($\Delta r_e = 0.4$ см) видны струйки длиной $0.4 < l_s < 1.0$ мм (рис. 1б, $t = 0.32$ мс). Здесь также выделены первичные быстрые брызги и вылетающие с задержкой $\Delta t \approx 50$ мкс более крупные капельки. Их скорости отличаются в 4 раза.

В конце фазы погружения остаток капли, с искаженным изображением лежащей на дне маски, окружает светлое кольцо – дно каверны и темная оболочка – стенка венца (рис. 1в, $t = 0.45$ мс). На тонкой пелене, наклоненной наружу, видны две группы шипов (на “4 часа”) длиной $0.8 < l_s < 1.2$ мм. Еще одна группа шипов развернута внутрь к капле (на “3, 6, 9 часов”). Разнонаправленность шипов свидетельствует о сложной структуре венца, состоящего из нескольких слоев. Быстрый внутренний слой стягивается в купол под действием сил поверхностного натяжения и сминается. На концах складок возникают короткие, направленные внутрь шипы, с вершин которых вылетают капельки. В направлении на “6 часов” на падающей капле видна каверна с группой капиллярных волн, как и в [8]. Наружный слой повернут к поверхности воды. Со временем все слои сливаются и формируют единую кромку венца.

При регистрации картины течения в вертикальной плоскости источник света устанавливался позади капли на наклонной линии визирования (2°). Под невозмущенной поверхностью (рис. 2, отмечена белой линией) располагается зеркальное отражение картины. Контакт капли сопровождают три группы мелких брызг (ширина штрихов $d_u < 0.03$ мм), летящих под углами 3° , 8° и 11° (рис. 2а, $t < 0.03$ мс). Скорость первой группы, состоящей из двух сгустков (внешнего тонко-

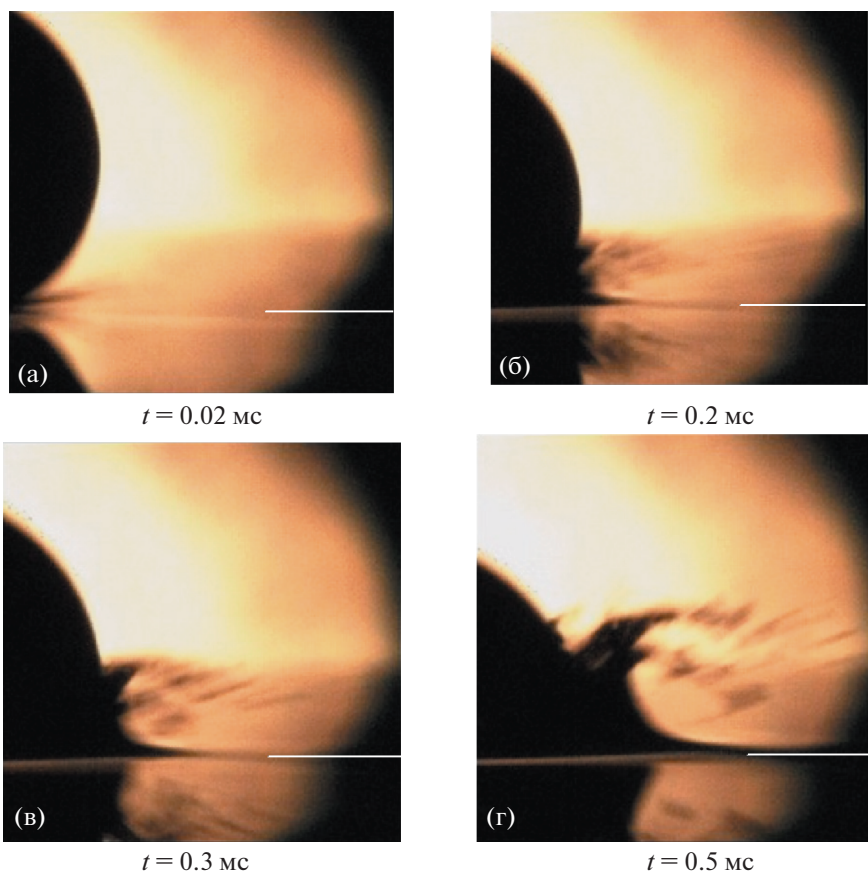


Рис. 2. Радиальные и наклонные группы брызг импакта капли ($D = 0.42$ см, $U = 3.4$ м/с, $Re = 14300$, $Fr = 290$, $We = 700$, $Bo = 2.4$, $Oh = 0.0018$, длина метки 1.5 мм, скорость съемки 10000 к/с).

го $l_d^1 = 2.0$ мм и внутреннего $l_d^2 = 1.14$ мм) равна $u_r = 20$ м/с, второй — $u_r = 11$ м/с. Толщина шипов $0.1 < d_s < 0.2$ мм.

За время $\Delta t = 0.1$ с первая группа брызг ($6^\circ < \varphi < 13^\circ$) сместились от источника на 1.0 см, а вторая ($16^\circ < \varphi < 45^\circ$) — на 0.45 мм. В кадре появилась новая группа брызг, а также шеврон венца, наклоненный под углом 46° . Со временем проявляется зональная структура брызг: при $t = 0.3$ мс штрихи длиной $l_d = 0.7$ мм разделены полосой 0.5 мм. Направления вылета основных групп капель сохраняются.

При $t = 0.5$ мс брызги вылетают радиально под углом $12^\circ < \varphi < 23^\circ$ к горизонту и наклонно вниз с вершин двух зубцов со скоростью $u_s = 7.8$ и 6.0 м/с, соответственно. Все источники действуют прерывисто, длительности пауз составляют $\Delta t \approx 50$ мкс. Погружение капли и рост венца сопровождаются плавным подъемом уровня жидкости. Число и скорость брызг плавно спадали с уменьшением скорости капли в диапазоне $2.4 < U < 3.4$ м/с.

На фотограмме окрашенные жидкостью капли струйки прослеживаются в венце и в расщеплен-

ной пленке с шипами длиной $2 < l_s < 3.5$ мм и толщиной $0.07 < d_s < 0.16$ мм (рис. 3, $t = 1$ мс). Постепенно слои сливаются в единый венец ($t = 2.3$ мс). Толщина пленки растет, меняется ее угловое положение. Траектории капель — штрихи, наклон которых растет по мере приближения к венцу, указывают на изменение положения и наклона шипа — источника всех брызг одной группы. Капли с шипов вылетают синхронно и собраны в разделенных кольцах.

Со временем число шипов убывает, их толщины ($d_s \approx 0.1$ см при $t = 3.7$ мс) и размеры капелек растут. Шесть эшелонов капелек свидетельствуют о сохранении цикличности процесса. Шипы шеврона высотой $0.07 < h_c < 0.26$ см включают обе контактирующие жидкости. В картине распределения волокон (тонких — $d_f < 0.08$ мм и более толстых — $d_f \sim 0.3$ мм) проявляется зональная структура, создаваемая волнами. На дне каверны волокна сходятся, пересекаются и формируют сетку с треугольным и более редкими четырех- и пятиугольными ячейками.

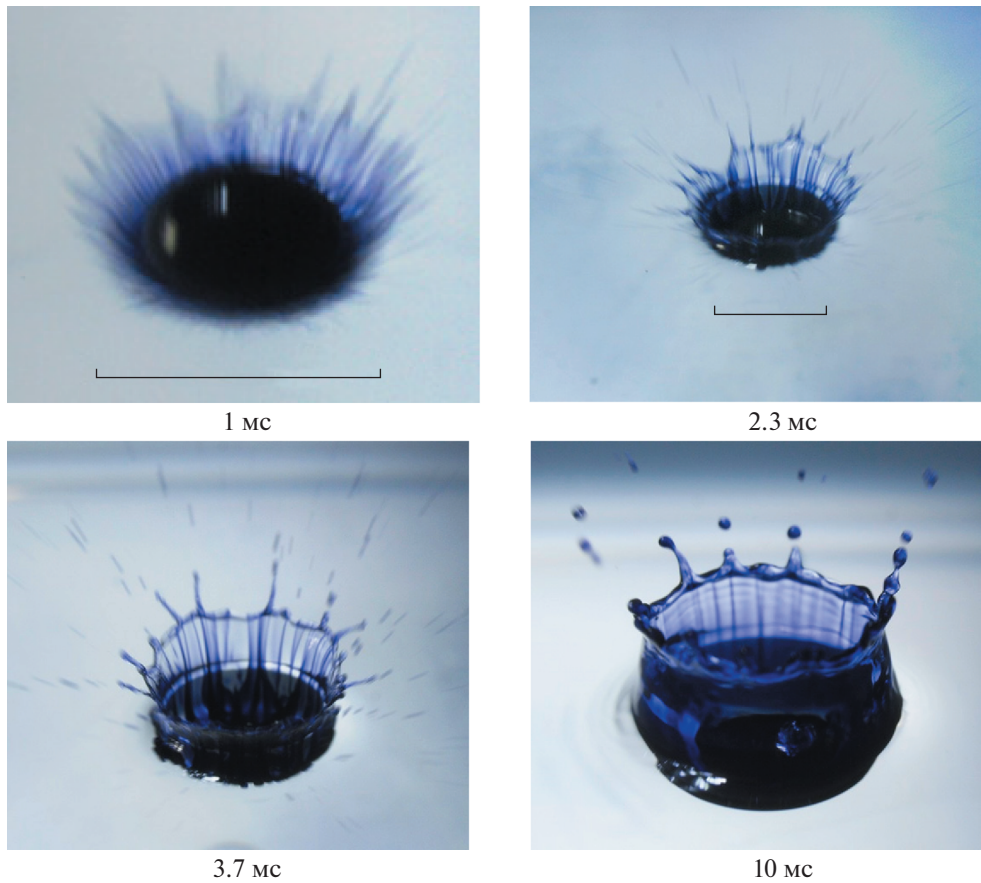


Рис. 3. Эволюция венца и поля брызг при погружении капли чернил ($D = 0.42$ см, $U = 3.9$ м/с, $Re = 16800$, $Fr = 390$, $We = 930$, $Bo = 2.4$, $Oh = 0.0018$, длина меток 0.5 см).

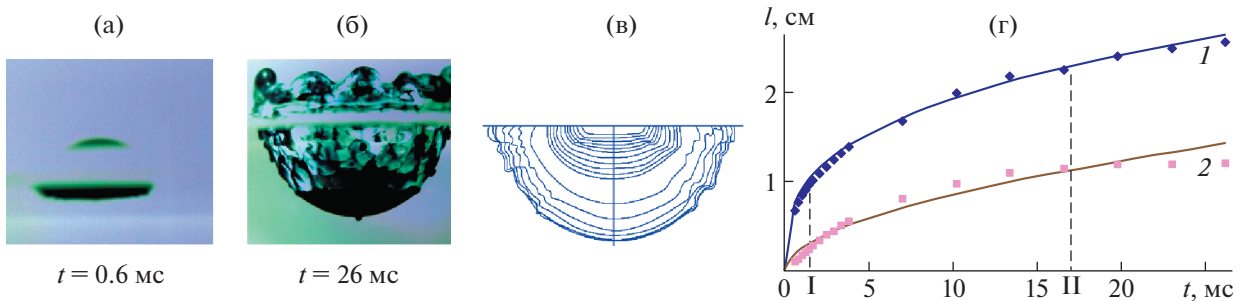


Рис. 4. Трансформация формы каверны: а, б – фотографии, в – последовательность контуров, г – зависимости диаметра (l) и глубины (2) от времени ($D = 0.42$ см, $U = 3.6$ м/с, $Re = 15500$, $Fr = 330$, $We = 800$, $Bo = 2.4$, $Oh = 0.0018$).

Два эшелона крупных капель ($d_b \sim 0.1$ см), вылетающих с интервалом $\Delta t \approx 2$ мс и отстоящих на $\Delta r = 0.36$ см наблюдаются при $t = 10$ мс. Толщина венца высотой $h_c = 0.47$ см переменная (от 0.6 до 0.9 мм), высота шипов на шевроне – от 1.2 до 2.6 мм. Расстояния между волокнами (толщиной от 0.1 до 0.3 мм) увеличиваются до 1.3 мм. Кольцевые структуры визуализируют капиллярные волны

длиной $0.31 < \lambda < 0.36$ мм, бегущие от шеврона к основанию венца.

Эволюция формы каверны упавшей капли раствора чернил, изменения ее размеров показаны на рис. 4. Сложный рисунок на стенках каверны – проекция волокнистого распределения материала капли [9]. Последовательность сечений отражает динамику изменения геометрии кавер-

ны, форма которой искажается капиллярными волнами. В начале погружения капли, когда активно идет конверсия поверхностной энергии, дно каверны плоское (рис. 4а, $t = 0.6$ мс). Со временем середина дна продавливается, и каверна приобретает эллиптическую форму (рис. 4б, $t = 26$ мс).

Размеры каверны с хорошей точностью аппроксимируются функциями: ширина $d(t) = 0.9t^{0.33}$, глубина $h(t) = 0.245 t^{0.54}$ ($[d] = \text{см}$, $[t] = \text{мс}$, точки на графике соответствуют приведенным контурам). Максимальная скорость роста ширины каверны $u_c = 10.5$ м/с, глубины — $w_c = 1.41$ м/с. Метки I ($t = 1.5$ мс) и II ($t = 17.2$ мс) отмечают полное слияние капли и вылет последней группы наиболее крупных капелек $d_b = 0.1$ см.

Во всех проведенных опытах в вылетающих брызгах регистрировались обе сливающиеся жидкости в отличие от [12], где вещество капли считается сосредоточенным на дне каверны.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19–19–00598).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Veron F. // Ann. Rev. Fluid Mech. 2015. V. 47 (1). P. 507–538. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010814-014651>
2. Fitt B.D.L., McCartney H.A., Walkalate P. // Ann. Rev. Phytopathol. 1989. V. 27. P. 241–270.
3. Vaezia A.R., Ahmadi M., Cerdà F. // Sci. Tot. Environ. 2017. V. 583. Is. 1. P. 382–392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.078>
4. Samiei E., Tabrizian M., Hoorfar M. // Lab A Chip. 2016. V. 16. P. 2376–2396. <https://doi.org/10.1039/C6LC00387G>
5. Коротеев А.А., Бондарева Н.В., Нагель Ю.А., Филатов Н.И., Байденко И.В. // Теплофиз. и аэромех. 2016. Т. 23. № 6. С. 915–922.
6. Worthington A. The splash of the drop. N.Y.: E. & J.B. Young & Co., 1895.
7. Agbaglah G., Thoraval M., Thoroddsen S., Zhang L., Fezzaa K. and Deegan R. // J. Fluid Mech. 2015. V. 764. P. R1–12.
8. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. // ДАН. 2015. Т. 465. № 4. С. 548–554.
9. Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю. // ДАН. 2018. Т. 481. № 2. С. 145–150.
10. Чашечкин Ю.Д. // Изв. РАН. Физ. атм. океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 67–77.
11. УИУ “ГФК ИПМех РАН”: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.
12. Berberović E., van Hinsberg N.P., Jakirlić S., Roisman I.V., Tropea C. // Phys. Rev. E. 2009. V. 79. 036306. <https://doi.org/10.1103/physreve.79.036306>

MULTIPLE EMISSIONS OF SPRAY AT DROP IMPACT

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

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

Presented by Academician of the RAS D.M. Klimov

Photo and video registration of all groups of small droplets (spray) emitted by drop submerging into a pool with water has been carried out for the first time with a drop diameter of $0.2 < D < 0.5$ cm and a velocity of $1 < U < 4.05$ m/s. In the splash formation mode, groups of droplets are ejected in echelons, first from the tops of the spikes on the veil around the primary contact area, then from the spikes on the edges of the split shells of the crown, and finally from the teeth of its chevron. The first spray fly out radially, the next ones — inward, around the cavity and vertically upward. Spray size grows with time from 0.1 to 1.0 mm, their velocities decrease from 20 to 1 m/s, the intervals between groups increase from 50 μs to 2.5 ms until the beginning of the smoothing of the crown teeth ($t \approx 17$ ms). The acceleration of the droplets is facilitated by the conversion of the available potential energy when the free surfaces of the merging fluids are annihilated.

Keywords: drop, spray, lamella, spikes, splash, trickles