

УДК 532.5

ГРУППЫ БРЫЗГ ИМПАКТА КАПЛИ ВОДЫ, СВОБОДНО ПАДАЮЩЕЙ В РАСПЛАВЛЕННЫЙ МЕТАЛЛ

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

Представлено академиком РАН Д.М. Климовым 15.03.2021 г.

Поступило 17.03.2021 г.

После доработки 17.03.2021 г.

Принято к публикации 24.03.2021 г.

Изменения состава групп капелек (брызг), вылетающих при падении в тигель с расплавом металла (сплав Розе при температуре 200°C) капли воды диаметром $D = 0.42$ см со скоростью $U = 3.3$ м/с, впервые прослежены методами фото- и видеорегистрации. В режиме образования всплеска группы мелких капелек воды последовательно выбрасываются с вершин шипов на пелене вокруг области первичного контакта, затем с шипов на кромке слоя растекания воды. Далее капельки воды вылетают вертикально и наклонно с вершин коротких струек – стримеров. Группы мелких капелек образуются при разрыве крупных пузырей. После формирования всплеска и отрыва его вершины с взвешенными газовыми пузырьками наблюдается выброс капель воды и составных капель, состоящих из металлического ядра и водной оболочки. На последней стадии наряду со струйками воды наблюдаются более редкие стримеры, состоящие из расплава, с вершин которых вылетают капельки металла. Прослежена геометрия каверны и слоя вскипающей воды растекающейся капли.

Ключевые слова: капля воды, тигель, расплав металла, брызги воды, пелена, шипы, всплеск, стримеры, капельки металла

DOI: 10.31857/S268674002103007X

Изучение динамики брызг (мелких капелек) – одного из компонентов процесса слияния капли с принимающей жидкостью, визуализированных уже в первых опытах [1], активно проводится с применением рентгеновской, световой и инфракрасной подсветки [2], гидрофонов и микрофонов [3], быстрых видеокамер [4]. Интерес обусловлен научной содержательностью явления и многообразием технических приложений в наземных и космических технологиях.

Картина течения в целом [5], динамика и траектории капелек, скорость которых на начальном этапе парадоксальным образом превышает скорость сливающейся капли [6], зависят от многих параметров – состава, термодинамических и кинетических свойств контактирующих сред, а также размеров, скорости и наклона траектории движения капли. Заметное влияние на образование брызг [6] и дискретное распределение вещества капли в принимающей жидкости оказывают и

быстрые, и медленные процессы конверсии и передачи энергии [7, 8]. Картина течения усложняется при падении капель воды в перегретое масло. Брызги воды выносят мелкие капельки масла, образуя легко воспламеняющийся туман [9].

Научный интерес представляет изучение влияния большой разности плотностей контактирующих сред на картину капельных течений. Общая геометрия каверны и всплеска, образующихся при падении капель металлов в ртуть и другие жидкие при комнатной температуре сплавы, наблюдаемая и рассчитанная в [10], подобна традиционной [5]. Влияние толщины оксидной пленки, которая образуется на поверхности металла в воздухе, на картину течения изучалось в [11, 12]. Анизотропия каверны и венца при импакте капли жидкого металла в горизонтальном магнитном поле прослежена в [13].

Интерес представляет изучение течения, образующегося при слиянии капли жидкости с расплавом металла, нагретым выше температуры ее кипения. Эволюция картины течения при падении капель и коротких вертикальных струек воды в расплав прослежена в [14]. В данной работе впервые визуализированы различные системы мелких капелек (брызг), последовательно образующихся при контакте свободно падающей капли воды с расплавленным металлом (сплавом Розе).

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

*E-mail: chakin@ipmnet.ru

**E-mail: yakush@ipmnet.ru

***E-mail: ilynykh@ipmnet.ru

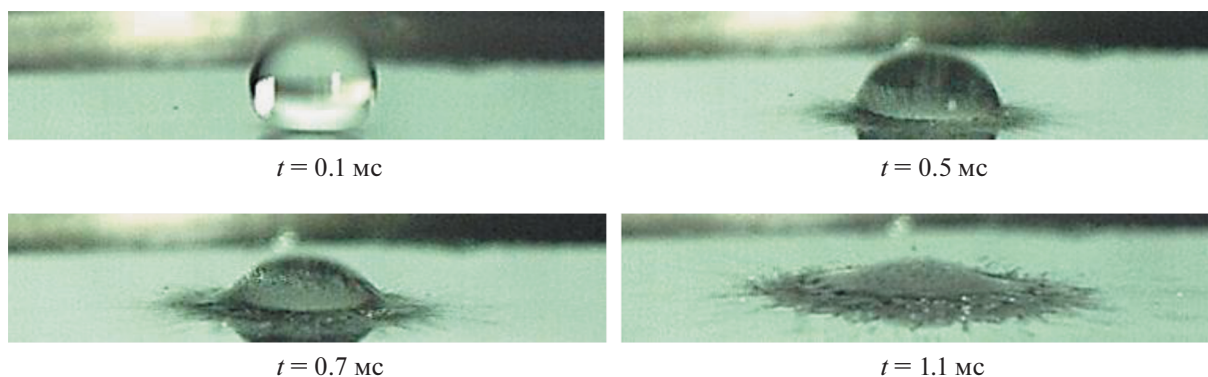


Рис. 1. Картина течения, вызванного падением капли воды на поверхность расплава металла: $D = 0.42$ см, $U = 3.3$ м/с, $T_d = 20^\circ\text{C}$, $T_m = 200^\circ\text{C}$, $E_d = 211$ мкДж, $E_\sigma = 4$ мкДж, $Re = 14000$, $Fr = 265$, $Bo = 2.39$, $Oh = 0.0018$, $We = 630$.

В опытах, выполненных на стендах УИУ “ГФК ИПМех РАН” [15], капли воды диаметром $D = 0.42$ см падали с высоты $H = 58$ см на поверхность жидкого сплава Розе (25% Sn, 25% Pb, 50% Bi) при температуре $T = 200^\circ\text{C}$, находящегося в тигле диаметром $D_t = 8.5$ см и глубиной $h = 2$ см, установленном на электрическом нагревателе мощностью 2 кВт. Течение, подсвеченное софитом ReyLab Xenos RH-1000 мощностью 1 кВт и светодиодами Optronis MultiLED, регистрировалось видеокамерой Optronis CR3000x2, скорость съемки составляла 5000 кадр/с. Более подробно методика приведена в [14]. Всего проведено 10 одинаковых опытов с каплями диаметром $D = 0.42$ см и скоростью в момент контакта $U = 3.3$ м/с. Для улучшения качества изображения в опытах изменялись положение и яркость осветителей.

Свойства сред и условия опытов, определяющие эволюцию структуры течения, характеризуются физическими параметрами или безразмерными числами Рейнольдса, Фруда, Бонда, Вебера, Онезорге [8, 14], дополненными отношениями плотностей расплава, принимающего каплю воды $\bar{\rho} = \frac{\rho_m}{\rho_w} = 9.4$, а также кинетической энергии капли E_k к доступной потенциальной поверхностной E_σ .

Разнообразие форм капель воды в момент контакта, влияющих на картину течения, определяет модальный состав колебаний Рэлея и групп капиллярных волн, образующихся при их отрыве. При первичном контакте симметричной капли воды (соотношение сторон 0.95, $t = 0.1$ мс, рис. 1) формируется тонкий диск, пронизанный струйками – шипами, выступающими с его кромки. С вершин шипов срываются последовательности мелких капелек, летящих под углами до 8° к горизонту, как и при контакте капли воды с водой [6].

При большой разности температур жидкого металла $T_m = 200^\circ\text{C}$ и воды $T_d = 20^\circ\text{C}$, вследствие конвективного и радиационного прогрева, мелкие капли быстро испаряются, длина их траекторий не превышает $l_f < 4.3$ мм ($t = 0.5$ мс, рис. 1). Погружающаяся капля (высота остатка $h_d = 2.1$ мм) формирует мелкий венец и ассиметрично растекается ($t = 0.7$ мс, рис. 1), ширина пятна воды справа и слева от каверны диаметром $d_c = 5.5$ мм составляет $\Delta r = 2.5$ и 2.2 мм. На внешней кромке воды в диапазоне углов от 4° до 8° выделяются быстрые тонкие струйки диаметром $d_s = 0.06\text{--}0.07$ мм и длиной $l_s < 1.4$ мм, вылетающие со скоростью $u_s = 6.2$ м/с, и более толстые медленные струйки, на вершинах которых находятся капельки диаметром $d_s = 0.08$ мм.

Ширина каверны растет по мере погружения капли и достигает $d_c = 7.6$ мм при $t = 1.1$ мс. Капля заполняет всю каверну и частично перетекает через венец, образуя слой воды шириной $\Delta r = 2.47$ мм справа и 2.44 мм слева. Толщину слоя воды увеличивают пузырьки в толще и на передней кромке диаметром до $d_b = 0.2$ мм. С вершин шипов на внешней кромке слоя воды длиной $l_s = 1.2$ мм в диапазоне углов $4^\circ < \varphi < 8^\circ$ продолжают вылетать тонкие быстро испаряющиеся капли. Здесь группа быстрых капелек (штрихов), летящих со скоростью $u_s = 6$ м/с, оторвалась от кромки слоя воды.

Постепенно картина течения усложняется, и при $t = 1.6$ мс (рис. 2) каверна диаметром $d_c = 13.4$ мм окружена небольшим венцом высотой $h_c = 0.54$ мм и слоем воды шириной $\Delta r = 3.35$ мм с отдельными газовыми пузырьками. Брызги продолжают вылетать настильно под углом менее 11° к горизонту. Над каверной появляются отдельные капельки воды диаметром $0.16 < d_s < 0.18$ мм. Брызги истончаются и испаряются в течение 1–2 мс, а

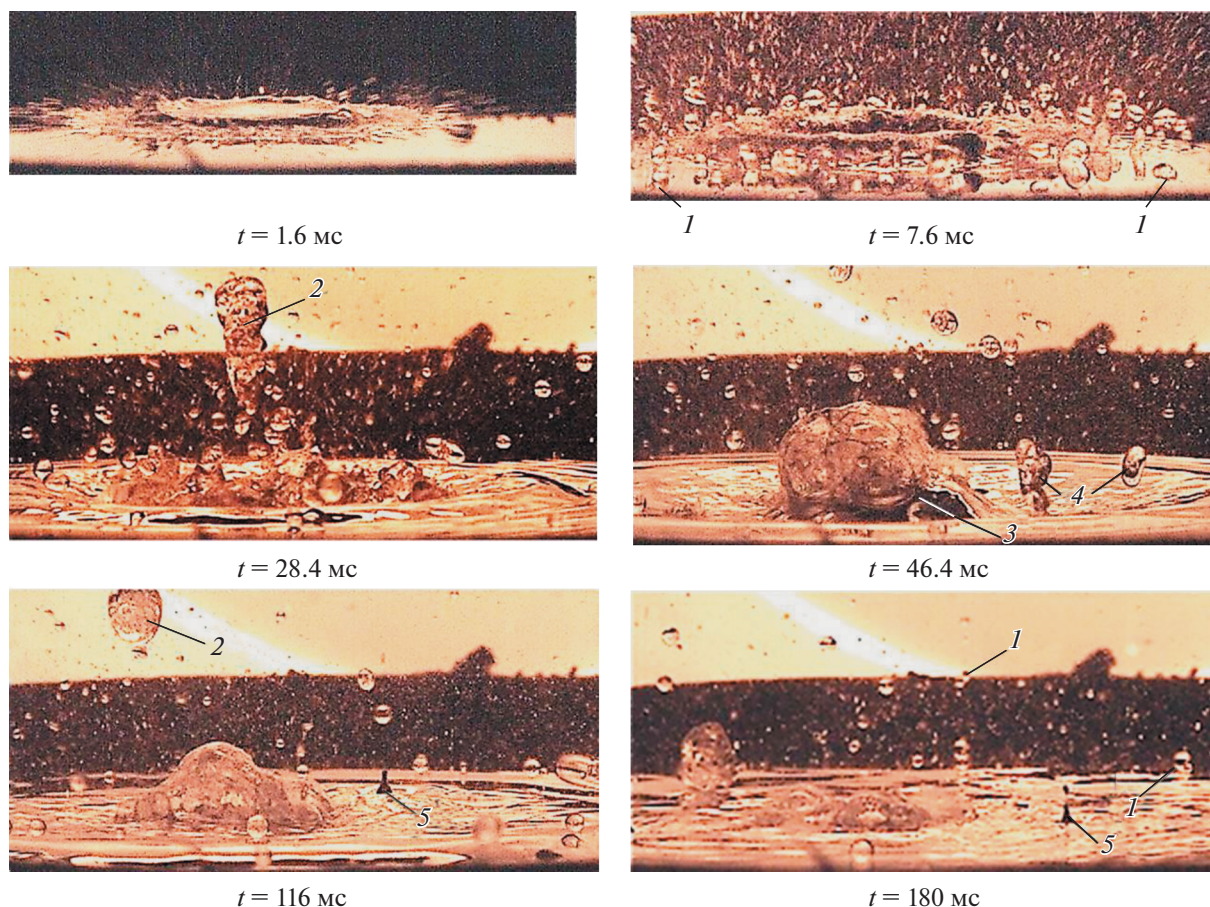


Рис. 2. Эволюция картины течения, вызванного падением капли воды на поверхность расплава металла (условия опыта – как и на рис. 1): 1 – последовательности капель с вершины стримера; 2 – отрывающийся оголовок всплеска воды с множественными пузырьками, частично распадается на капли; 3 – вершина всплеска расплава металла; 4 – составные капли – жидкометаллическое ядро в водной оболочке, 5 – металлические стримеры, выбрасывающие мелкие капли металла.

крупные капли, как и слой воды с пузырьками, отделенный от металла газопаровой прослойкой, существуют дольше.

Рассмотрение видеофильма показывает, что при $t \approx 4.8$ мс картина течения меняется, число выброшенных капель резко возрастает. Мелкие капли летят во всех направлениях, крупные капли последовательно выбрасываются вертикально и наклонно (в диапазоне углов $\pm 40^\circ$). Несколько мелких капель располагаются над каверной при $t = 7.6$ мс (рис. 2). Основные брызги диаметром $0.27 < d_s < 1.0$ мм последовательно вылетают вертикально со скоростью $0.3 < u_s < 0.5$ м/с из слоя воды вокруг венца и сохраняющихся на поверхности расплава остатков капелек. Мелкие капли $0.2 < d_s < 0.3$ мм разлетаются со скоростью $1.4 < u_s < 2.2$ в широком диапазоне углов. Вертикальные струйки (стримеры), выбрасывающие капли, спонтанно появляются, хаотически движутся и вертикально осциллируют, порождая короткие

капиллярные волны и течения, деформирующие поверхность расплава металла.

Испарение и рост числа пузырьков приводят к распаду слоя воды на глобулы, между которыми видны участки поверхности металла. Область эжекции капель (около 16.5 мм в диаметре) окружают кольцевые капиллярные волны длиной $\lambda_c \sim 0.15$ мм. Высота покрытого водой венца продолжает расти и достигает $h_c = 1.07$ мм.

С уменьшением площади слоя воды основным источником брызг становится область остатка каверны, в которой выражены отдельные толстые “пляшущие” струйки конической формы диаметром $d_s \sim 0.5$ мм и высотой $2.0 < h_c < 3.1$ мм, с вершин которых выбрасываются крупные капли диаметром $0.4 < d_s < 1.6$ мм со скоростью $u_s \sim 0.3$ м/с ($t = 28.4$ мс, рис. 2).

При этом в общей структуре картины течения сохраняются элементы, типичные для процесса погружения капли в воду – брызги, каверна, ве-

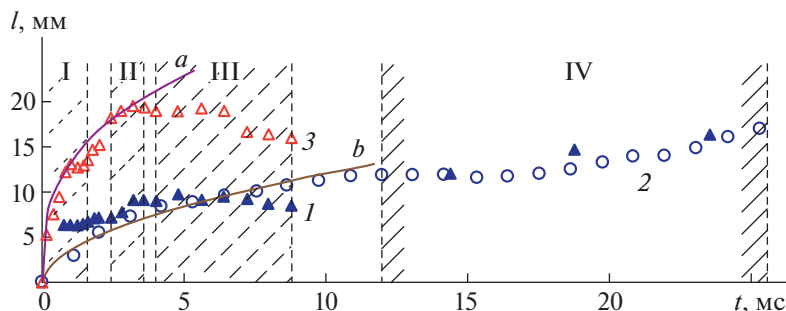


Рис. 3. Геометрия каверны и остатка капли – слоя воды (условия опыта – как и на рис. 1): 1, 2 – диаметр каверны в жидком металле и в воде, 3 – ширина слоя воды.

нец, всплеск [1, 3, 5, 6]. Центральный всплеск (наклонная кумулятивная струя воды диаметром $d_c = 1.9$ мм с вкраплениями газопаровых пузырьков диаметром $d_v = 0.4$ мм) появляется при $t = 28.4$ мс. Верхняя часть струи, движущаяся со скоростью $u_v = 0.35$ м/с, отрывается от основания. Образовавшийся разрыв частично заполняют брызги диаметрами до 1 мм. Вершина кумулятивной струи при $t = 46.4$ мс покидает поле зрения.

Вода в центре каверны осциллирует, последовательно растекается и стягивается в компактный объем, насыщенный пузырьками. Подвижна и поверхность расплава металла, которая вспучивается в центре и образует всплеск высотой $h_p = 2$ мм с диаметром пьедестала $d_p = 8$ мм ($t = 46.4$ мс, рис. 2). Компактный объем, который дополняют отдельные капли воды диаметром $0.1 < d_s < 0.16$ мм, хаотически перемещается по наклонной боковой поверхности всплеска металла в центре течения.

Вода в центре каверны, отделенная газопаровой прослойкой, длительное время сохраняется над поверхностью металла, кипит и пузырится. Разрывающиеся крупные пузыри порождают большое число мелких брызг. Одновременно капли последовательно вылетают с вершин коротких осциллирующих струек воды – стримеров, ориентированных вертикально или наклонно. Осциллирующие стримеры порождают большое число коротких капиллярных кольцевых волн, создающих “волновую толчею”. Однако по мере испарения воды общее число капель заметно уменьшается.

На заключительном этапе вертикальные струйки воды дополняют струйки металла – темные конические выступы 5 с диаметром основания $d_s^m = 0.93$ мм и высотой $h_s^m = 1.1$ мм, окруженные кольцом капиллярных волн ($t = 116$ и 180 мс, рис. 2). Капля металла ($d_m = 0.1$ мм) над стримером 5 летит со скоростью $u_m = 1.5$ м/с. Здесь в левой части рисунка появляется стянутая в единый объем капля, выброшенная с вершины всплеска при

$t = 28.4$ мс. Она касается поверхности металла со скоростью $U_d^s = 0.38$ м/с при $t = 180$ мс. Из области контакта капли вылетает радиальная система тонких брызг, как и при погружении первичной капли на рис. 1, а также формируется группа кольцевых капиллярных волн.

Немонотонные изменения диаметров каверны импакта капли воды в расплаве (кривая 1 на рис. 3) и ширины окружающего слоя воды (или газопаровой эмульсии) от времени свидетельствуют о сложном характере протекающих процессов, которые включают деформацию поверхности металла, проникновение части капли воды в толщу расплава, растекание постепенно вскипающего слоя воды вокруг каверны. Начальные участки данных 2 и 3 интерполируются кривыми $l_2 = 3.8\sqrt{t}$ и $l_3 = 13\sqrt[3]{t}$, [l] = мм, [t] = мс.

Вначале, при $t < 1$ мс, горизонтальный размер каверны в металле (кривая 1) растет быстрее, чем при падении капли воды в воду (кривая 2). При $t = 2.5$ мс размеры каверны в воде и в металле сравниваются и до $t = 25$ мс растут практически синхронно. При $9 < t < 12$ мс стенки каверны покрыты слоем кипящей воды, затрудняющей идентификацию их положения. Ускоренный рост каверны на начальной стадии обусловлен дополнительным влиянием быстрого переноса импульса в горизонтальном направлении, связанным с высвобождением потенциальной энергии и кипением жидкости, создающим дополнительные горизонтальные градиенты давления.

Размеры слоя воды немонотонно растут на этапах I и II, достигают максимума при $t = 3.6$ мс, далее размер слоя стабилизируется и медленно убывает из-за капиллярного стягивания пятна жидкости и испарения воды. Возмущения более выражены на кривой 2, где представлены и выпуклые, и вогнутые участки. Выделяются четыре осцилляции длительностями 0.8, 2.4, 3.2 мс (вогнутый участок) и 2.4 мс.

Штрихами отмечены интервалы образования тонких настильных брызг I; капелек, вылетающих с

вершин наклонных шипов II; мелких и крупных капелек с вершин водных стримеров III; образования всплеска слоя воды, отрыва вершины всплеска, формирования крупных стримеров IV. При $t > 12$ мс появляется большое число капель с газопаровыми пузырьками, при $t > 25$ мс растут размеры взрывающихся газовых пузырей, разбрасывающих мелкие капли. При $t > 45$ мс остатки воды стягиваются в газопаровую сферу над осциллирующей поверхностью металла. Одновременно формируются крупные составные капли с металлическим ядром и водной оболочкой. При $t > 116$ мс основным источником капель становятся вертикальные струйки воды и металла, механизмы формирования которых требуют дальнейшего изучения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект 19-19-00598 (Ю.Д.Ч. — обсуждение постановки, планирование и организация эксперимента, анализ результатов, редактирование текста; А.Ю.И. — подготовка стенда, проведение опытов, обработка данных, подготовка текста); 18-19-00289 (С.Е.Я. — обсуждения постановки, методики, результатов, редактирование текста рукописи). Опыты проведены на стендах УИУ “ГФК ИПМех РАН”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Worthington A.* The splash of the drop. N.Y.: E. & J.B. Young & Co, 1895.
2. *Liang G., Mudawar I.* // Intern. J. Heat Mass Trans. 2016. V. 101. P. 577–519.
3. *Prosperetti A., Oguz H.N.* // Annu. Rev. Fluid Mech. 1993. V. 25. P. 577–602.
4. *Thoroddsen S.T., Etoh T.G., Takehara K.* // Annu. Rev. Fluid Mech. 2008. V. 40. P. 257–285.
5. *Ray B., Biswas G., Sharma A.* // J. Fluid Mech. 2015. V. 768. P. 492–523.
6. *Чашечкин Ю.Д., Ильиных А.Ю.* // Доклады РАН. Физика, технические науки. 2020. Т. 494. С. 42–46.
7. *Ma H., Liu C., Li H., Huang H., Dong J.* // Phys. Fluids. 2019. V. 31. 062108.
8. *Чашечкин Ю.Д.* // Изв. РАН. Физ. атм. океана. 2019. Т. 55. № 3. С. 67–77.
9. *Wang H.-S., Zhao X.-D., Zhang Y.* // J. Fire Sci. 2009. V. 27. Iss. 6. P. 545–559.
10. *Kaudze M.Z., Lielauses O.A.* // Mag. Hidrodin. 1984. V. 1. P. 37–43.
11. *Li H., Mei S., Wang L., Gao Y., Liu J.* // J. Heat Fluid Flow. 2014. V. 47. P. 1–8.
12. *Xu Q., Brown E., Jaeger H.M.* // Phys. Rev. 2013. № 87(4–1). 043012.
13. *Ren D. W., Wu S., Yang J.C., Ni M.J.* // Phys. Fluids. 2020. V. 32. 053311.
14. *Yakush S.E., Chashechkin Y.D., Ilinykh A.Y., Usanov V.A.* // Appl. Sci. 2021. V. 1. Iss. 3. 909.
15. УИУ “ГФК ИПМех РАН”: <http://www.ipmnet.ru/uniquequip/gfk/#equip>.

GROUPS OF SPRAYS OF A WATER DROP FREE FALLING INTO THE MELTED METAL IMPACT

Yu. D. Chashechkin^a, S. E. Yakush^a, and A. Yu. Ilinykh^a

^a*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*
Presented by Academician of the RAS D.M. Klimov

Changes in the composition of groups of droplets (sprays) emitted by a drop of water $D = 0.42$ cm in diameter at a velocity of $U = 3.3$ m/s falling into a crucible with a metal melt (Rose alloy at a temperature of 200°C) were traced by photo and video recording for the first time. In the splash formation mode, groups of small water droplets are subsequently ejected from the tops of the spikes on the veil around the primary contact area, then from the spikes at the rim of the spreading layer. Further, water droplets fly out vertically and obliquely from the tops of short jets — streamers. Groups of small droplets are formed when large bubbles burst. After the formation of a splash and the detachment of its top with suspended gas bubbles, an emission of compound droplets consisting of a metal core and a water shell is observed. At the last stage, along with water streamers, more rare streamers consisting of melt alloy are observed, from the tops of which metal droplets fly out. The geometry of the cavity and the layer of boiling water of the spreading drop is traced.

Keywords: water drop, crucible, metal melt, water spray, shroud, spikes, splash, streamers, metal droplets