



Экспериментальное исследование взаимодействия импульсной струи воды с расплавленным металлом¹

Ильиных А.Ю., Усанов В.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

Столкновение капель и струй жидкости со свободной поверхностью одной и той же или другой жидкости было предметом обширных исследований в течение последнего столетия, начиная с пионерских работ Уоррингтона [1]. Взаимодействие падающей жидкости и принимающей жидкости характеризуется быстрым перераспределением импульса, энергии и массы, вызывающим разлет быстрых мелкодисперсных капель и образование центральной струи, которая поднимается выше точки столкновения [2–4]. В частности, было установлено, что такие параметры, как глубина слоя принимающей жидкости, вязкость и поверхностное натяжение, играют важную роль в развитии полости и формировании центральной струи.

Хотя существует множество работ, посвященных столкновению капель с поверхностью одной и той же жидкости (или жидкости с аналогичной плотностью), гораздо менее изучены такие взаимодействия, когда объем жидкости с меньшей плотностью ударяется о поверхность гораздо более тя-

желой жидкости (скажем, взаимодействие воды с жидким металлом). Особое значение имеют такие взаимодействия, когда гидродинамические аспекты сосуществуют с тепловыми, как в случае, когда вода взаимодействует с высокотемпературным расплавом какого-либо металла или ядерного материала (кориума). Быстрое испарение охлаждающей жидкости при контакте с высокотемпературным расплавленным материалом может привести к паровым взрывам, которые рассматриваются как одна из основных опасностей тяжелых аварий [5].

Настоящая работа посвящена исследованию воздействия импульсной струи воды со свободной поверхностью слоя расплавленного металла. Эксперименты проводятся при соотношении плотности расплава и воды около 10:1, в отличие от гораздо лучше изученных систем (вода-вода, вода-чернила, вода-глицерин, жидкий металл-жидкий металл и т.д.), где это соотношение составляет около 1:1. Это исследование значительно расширяет недавнее исследование взаимодействия воды и металла [6, 7] за счет улучшения повторяемости параметров струи воды, и изучения влияния формы емкости для расплава, глубины слоя расплава и температуры воды. Его новизна также состоит в детальном изучении гидродинамики образования полости (каверны) в слое расплава и ее схло-

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант 18-19-00289) и в рамках гос. задания ИПМех РАН (тема 123021700057-0)

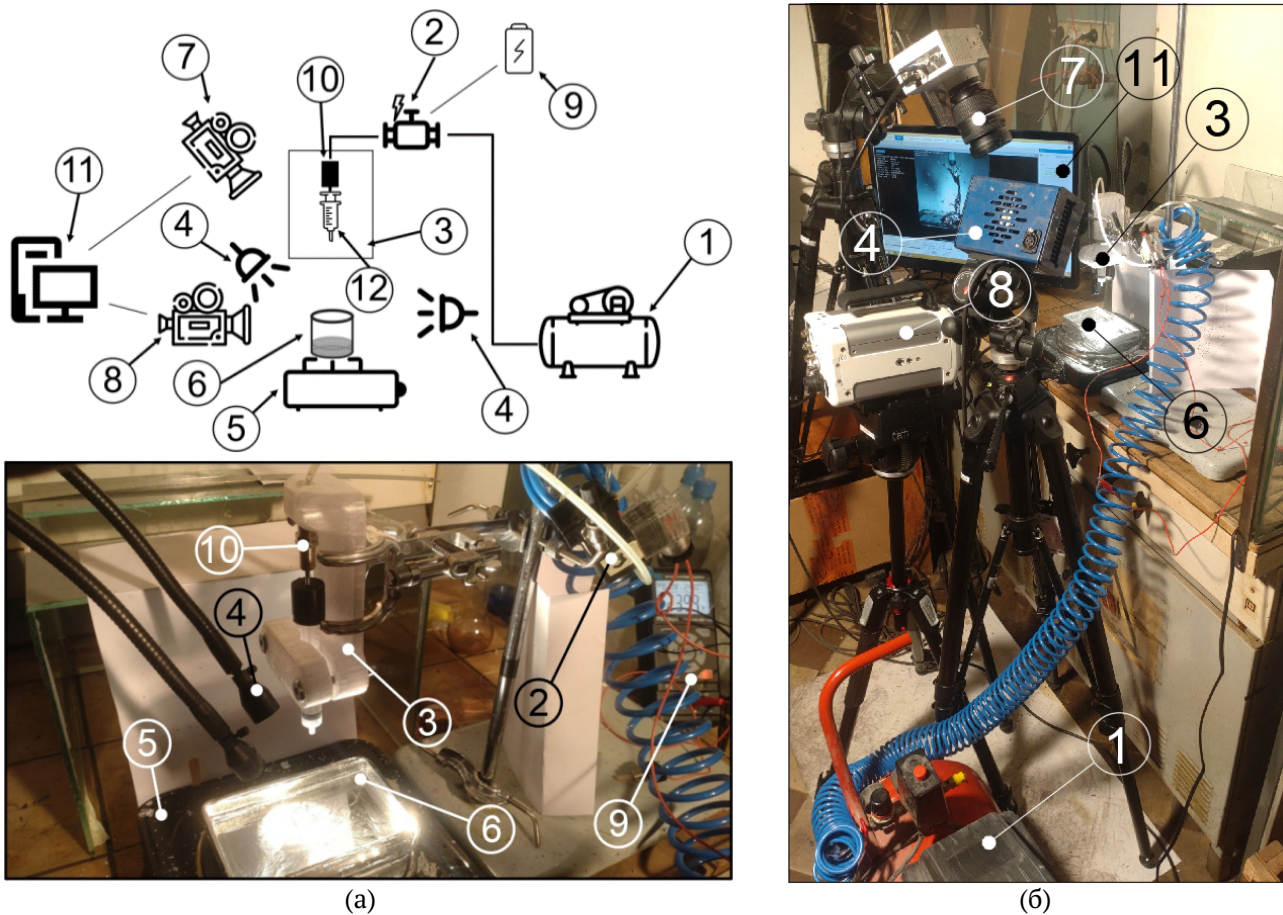


Рис. 1. Экспериментальная установка для изучения брызг расплава, вызванных воздействием импульсной струи воды: (а) вид спереди; (б) вид сбоку; (в) система подачи воды (увеличенный вид). 1 – воздушный компрессор, 2 – пневмоклапан, 3 – держатель шприца, 4 – источники света, 5 – электронный сосуд, 6 – испытательный сосуд, 7 – видеокамера Opttronis CR3000×2, 8 – видеокамера Photron FASTCAM Nova S9, 9 – источник питания постоянного тока 24 В, 10 – пневмошток, 11 – компьютер, 12 – шприц

пывания. Проведенное исследование повторяемости проливает свет на неопределенность высоты всплесков расплава, возникающих при одних и тех же начальных условиях. Свободно падающие капли воды, также рассмотренные в [6, 7], не рассматриваются в текущей работе, поскольку их воздействие вызывало гораздо более слабые всплески расплава из-за высокого соотношения плотности расплава и воды.

Параметры экспериментальной установки

Экспериментальная установка, используемая в данном исследовании, показана на Рис. 1. Ключевым элементом конструкции экспериментальной установки является система подачи водяной струи, главным требованием к которой ставилось обеспечение повторяемости скорости и формы водя-

ной струи. Центральным элементом системы подачи является медицинский шприц (в эксперименте использовались два типа шприца на 2 мл и 5 мл), на поршень которого воздействует пневмошток, обеспечивая подачу воды с постоянной скоростью. Управляющее давление воздуха в ресивере компрессора для привода пневмоштока варьировалось от 0,6 МПа до 0,7 МПа.

В качестве принимающей жидкости в экспериментах был выбран сплав Розе, состав которого Sn – 25%, Pb – 25%, Bi – 50%. Этот сплав обладает низкой температурой плавления равной 94°C и высокой плотностью 9720 кг/м³. Сплав Розе имеет удельную теплоемкость 0,147 кДж/(кг·К), коэффициент теплопроводности 16,3 Вт/(м·К), коэффициент поверхностного натяжения 410 мН/м. Для импульсной струи бралась водопроводная вода объемом 0,4–1 мл с начальной температурой от 25°C до 90°C, температура расплава во всех экспериментах

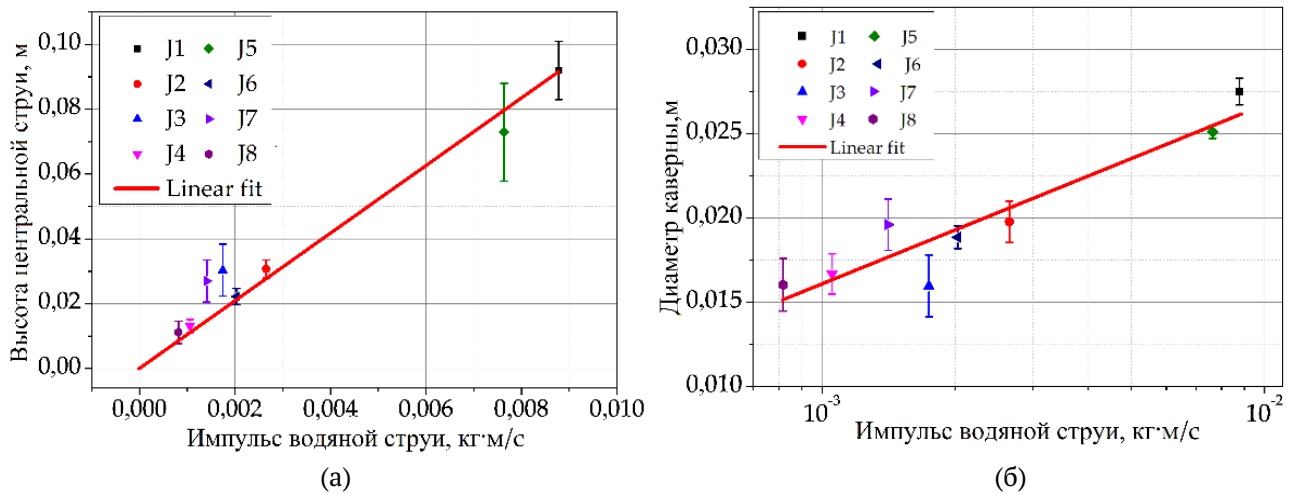


Рис. 2. (а)– зависимость высоты кумулятивной струи от импульсы водяной струи, (б)– зависимость диаметра каверны от импульсы водяной струи.

была равна 300°С. Всего было проведено 14 серий опытов (J1–J14) с вариацией различных параметров эксперимента, в каждой серии выполнялось по пять опытов с одинаковыми параметрами для того, чтобы оценить повторяемость результатов и соответствующую неопределенность, всего было проведено 70 опытов. Также для исследования влияния формы резервуара с расплавом брались круглая и прямоугольные кюветы с глубиной расплава 14 мм и 18 мм.

Результаты

В первых сериях опытов (J1–J8) исследовалась зависимость параметров всплеска от импульса водяной струи (определяемый как произведение массы воды и скорости струи до удара). Определение величины скорости и геометрических размеров струи, а также параметров всплеска, осуществлялось оптическим методом, путем определения координат по кадрам, записанным на высокоскоростную камеру. Как уже было сказано выше, скорость водяной струи прямо зависит от давления управляющего воздуха. В проведенных сериях опытов осредненная скорость водяной струи менялась в диапазоне от 4,1 м/с до 8,8 м/с с максимальным стандартным отклонением 0,8 м/с и относительным стандартным отклонением 10,3%. Импульс струи, определяемый по формуле $I = \rho V U$, варьируется от 0,8 г·м/с до 8,8 г·м/с. Высота кумулятивной струи по мере увеличения импульса струи также увеличивается с 11,2 мм до 96,3 мм с максимальными стандартным отклонением величины 13,7 мм и относительным стандартным отклонением 26,8%. Диаметр каверны, также как и высота

кумулятивной струи, увеличивается с 16 мм до 27,5 мм, с максимальными стандартным отклонением величины 1,6 мм и относительным стандартным отклонением 8,8%. Полученные зависимости, представлены на Рис. 2.

Прямая линия на каждом графике соответствует линейной функции, полученной как наиболее подходящая для необработанных (неосредненных) данных, следующим образом:

$$h = k_h \cdot I$$

где h – усредненная высота подъема центральной струи, I – суммарный импульс струи воды и $k_h = 10,45$ – коэффициент пропорциональности, полученный методом наименьших квадратов

$$D = a_D \log_{10} I + b_D,$$

где D – диаметр каверны, $a_D = 1,017 \cdot 10^{-2}$, $b_D = 4,67 \cdot 10^{-2}$.

Переходя к сравнению случаев с круглой кюветой и прямоугольной видно, что в прямоугольном сосуде (вариант J11) результирующая центральная струя, образованная расплавом, была медленнее (1,66 м/с против 2,75 м/с) и поднималась на меньшую высоту (75,6 мм против 96,3 мм) при сопоставимом диаметре каверны (25,7 мм против 27,8 мм). Скорость удара в случае с прямоугольной кюветой была немного выше, чем в случае с круглой (9,03 м/с против 8,8 м/с). Более слабая центральная струя может быть объяснена асимметричной (нецилиндрической) формой прямоугольного сосуда, которая может проявляться разной скоростью внутренних и капиллярных волн, проходящих вдоль и поперек сосуда, и может вызвать асимметричное

сжатие полости и, таким образом, более слабую центральную струю. Для цилиндрического сосуда с осевым воздействием струи, напротив, волны отражались от стенки и достигали полости примерно в одно время, усиливая центральную струю.

Сравнение случаев с меньшими импульсами водяной струи приводит к одному и тому же выводу относительно скорости центральной струи (более медленной в прямоугольном сосуде). Однако высота подъема центральной струи в прямоугольной и круглой кюветах практически совпадает.

Влияние температуры воды на параметры всплеска не были настолько однозначными. Повышение температуры воды снижало вязкость и поверхностное натяжение жидкости, тем самым снижая сопротивление в системе подачи воды и увеличивая скорость удара. Относительная разница в скорости удара в случаях с горячей водой (70–90°С) водой и водой холодной (25°С) при прочих равных условиях достигала 21%, что указывает на увеличение кинетической энергии струи воды на 48%. Также температура горячей воды обладала меньшей разностью по отношению к температуре кипения. Это способствовало вскипанию жидкой воды при взаимодействии с расплавом и горячим дном сосуда, что потенциально приводило к более быстрому испарению и образованию больших объемов пара.

Результаты, полученные в тестах с горячей водой, не позволяют сделать вывод об относительной роли испарения воды в увеличении разбрызгивания металла по сравнению с чисто гидродинамическими эффектами из-за более быстрой генерации струи при том же давлении управляющего воздуха. Поэтому для выяснения этого вопроса требуются специализированные экспериментальные и теоретические исследования.

Заключение

Эксперименты, проведенные в этой работе, подтвердили, что, несмотря на большую разницу плотностей между воздействующей и принимающей жидкостями, происходит значительное разбрызгивание расплава, включая образование центральной струи, поднимающейся на высоту нескольких сантиметров. Импульс водяной струи является основным параметром, определяющим максимальный диаметр и глубину полости на поверхности расплава и высоту центральной струи, поднимающейся над бассейном расплава. Влияние размера и формы сосуда на параметры всплеска расплава является слабым по сравнению с влиянием импульса водяной струи. А температура воды и глубина слоя расплава оказывают довольно слабое влияние на характеристики всплеска расплава, по крайней мере, в диапазонах параметров, изученных в данной работе.

Список литературы

- [1] *Worthington A.M.* A Study of Splashes; Longmans, Green, and Company: London, UK, 1908.
- [2] *Fedorchenko A.I., Wang A.-B.* On some common features of drop impact on liquid surfaces // *Phys. Fluids*. 2004. 16. 1349–1365. <https://doi.org/10.1063/1.1652061>.
- [3] *Castillo-Orozco E., Davanlou A., Choudhury P.K., Kumar R.* Droplet impact on deep liquid pools: Rayleigh jet to formation of secondary droplets // *Phys. Rev. E* 2015. 92, 053022. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.92.053022>.
- [4] *Berberović E., van Hinsberg N.P., Jakirlić S., Roisman I.V., Tropea C.* Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution // *Phys. Rev. E* 2009. 79. 036306. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.79.036306>.
- [5] *Berthoud G.* Vapor Explosions // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2000. 32. 573–611. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.573>.
- [6] *Yakush S.E., Chashechkin Y.D., Ilinykh A.Y., Usanov V.A.* The splashing of melt upon the impact of water droplets and jets // *Appl. Sci.* 2021. 11. 909. <https://doi.org/10.3390/app11030909>.
- [7] *Chashechkin Y.D., Yakush S.E., Ilinykh A.Y.* Groups of sprays from the impact of a water drop falling freely into a melted metal // *Dokl. Phys.* 2021. 66. 164–168. <https://doi.org/10.1134/S1028335821060033>.