

Экспериментальное исследование маломасштабных паровых взрывов

Ю. П. Ивочкин¹, П. И. Поляков¹, И. О. Тепляков¹ и С. М. Юдин^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Московский энергетический институт (технический университет), Красноказарменная ул., 14, Москва 111250, Россия

E-mail: paul.ingvarsson@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2024 г.

Аннотация. Выполнена численная оценка величины разрушительного для рабочего сосуда импульса давления, который сгенерирован при взрывной фрагментации горячей жидкометаллической капли, падающей в воду комнатной температуры. Представлены результаты экспериментов по исследованию особенностей дробления капель низкоплавких металлов и сплавов (олово, висмут, свинец, цинк, алюминий, сплавы Розе и Вуда), выполненных при начальной температуре расплава 700 °С и массе 10 г. В опытах, помимо контроля температур расплава и охлаждающей воды, измерялись пульсации давления, а также велась скоростная видеосъемка процесса фрагментации. Были установлены существенные различия в дроблении исследуемых расплавов. Показано, что наибольшие амплитуды импульсов давления, достигающие значений ~ 2 МПа, наблюдались при фрагментации одиночных оловянных капель. Подтверждена возможность инициирования спонтанного парового взрыва посредством взрывного дробления отдельной капли.
<https://doi.org/10.33849/2024405>

1. ВВЕДЕНИЕ

Среди теплофизических явлений, наблюдаемых в природе и технических устройствах, особое место по опасным последствиям занимают паровые взрывы [1–3]. Подобные взрывы могут возникать, например, при взаимодействии воды, недогретой до температуры насыщения, с горячим расплавом. Паровые взрывы характеризуются высокоинтенсивными импульсами давления, которые обусловлены резким ростом скорости парообразования охладителя в условиях взрывной фрагментации горячей жидкости.

Механизмы протекания паровых взрывов, наблюдавшихся, в том числе, на крупных установках в атомной энергетике и металлургии, изучены недостаточно полно, в частности, из-за отсутствия необходимых опытных данных. Наиболее эффективный подход к экспериментальному исследованию промышленных паровых взрывов основан на физическом моделировании различных этапов на установках малого масштаба. Например, падение капель горячих металлов в воду, имеющую температуру ниже температуры насыщения, сопровождается фрагментацией расплава на мелкие осколки и импульсами давления в охладителе [1]. Подобный процесс, называемый маломасштабным паровым взрывом, позволяет в деталях моделировать и изучить важный этап инициирования промышленных паровых взрывов, которые наблюдались в металлургии, атомной энергетике и целлюлозно-бумажной отрасли [4, 5]. Однако, даже при проведении лабораторных опытов, вследствие технических трудностей экспериментов с жидкими кориумом и сталью, вместо них обычно используются легкоплавкие металлы: олово, висмут, свинец, цинк, а также сплавы Вуда, Розе, Филдса и т.п. Вопрос о правомерности применения опытных данных, полученных на легкоплавких металлах, применительно к описанию механизмов фрагментации жидких сталей и кориума, остается открытым.

Цель представленного исследования состоит в изучении особенностей фрагментации различных легкоплавких материалов и правомерности использования

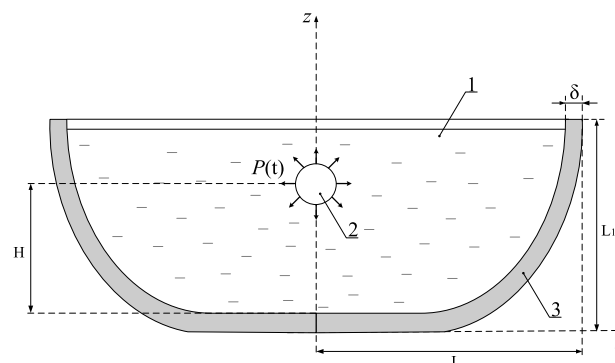


Рисунок 1. Схема фарфоровой емкости. 1 — охлаждающая жидкость, 2 — источник взрыва, 3 — фарфоровый резервуар.

полученных опытных данных в моделях генерации крупных паровых взрывов.

2. ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ ДАВЛЕНИЯ

Как указывалось выше, в экспериментах с горячими жидкометаллическими каплями, падающими в холодную воду, генерируются импульсы давления. Амплитуда подобных импульсов, несмотря на малый масштаб проводимых опытов, может достигать значений, способных привести к серьезным авариям, связанным с разрушением сосуда с охлаждающей жидкостью. Так, в ходе наших наладочных опытов со свинцом (температура расплава 900 °С, масса ~ 20 г) наблюдалось разрушение фарфоровой емкости, предназначенной для сбора продуктов фрагментации (рисунок 1). Располагая физическими свойствами материала емкости и ее геометрическими размерами (таблица 1), оценим значение критического давления $P_{пред.}$, вызывающее разрушение этого сосуда.

Грубую оценку величины значения избыточного стационарного давления $P_{пред.}$, необходимого для

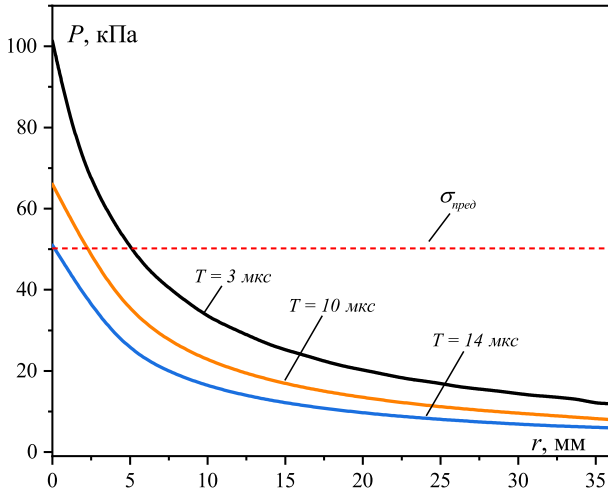


Рисунок 2. Зависимость величины амплитудного значения давления при распространении от источника взрыва до внутренней стенки сосуда при различной длительности импульса давления T . r — радиальное расстояние от границы взрыва.

разрушения полусферической оболочки, можно выполнить по формуле (1), справедливой для случая стационарной нагрузки сферической емкости [6]:

$$P_{\text{пред.}} = \frac{2h\sigma_{\text{пред.}}}{R}, \quad (1)$$

где R и h — радиус и толщина стенки сосуда, $\sigma_{\text{пред.}}$ — предельное эквивалентное механическое напряжение. С учетом данных из таблицы 1 предельное значение давления для нашего случая ($R = 65$ мм, $h = 3$ мм, $\sigma_{\text{пред.}} = 50$ МПа [7]) $P_{\text{пред.}} = 4.6$ МПа.

С целью определения уточненного значения $P_{\text{пред.}}$ были выполнены численные расчеты параметров звуковой волны, необходимые для разрушения сосуда с параметрами, указанными в таблице 1. При проведении расчетов предполагалось: 1) температура охлаждающей воды 18°C ; 2) значение скорости звука во всем объеме охладителя постоянно; 3) возмущения, возникающие на фронте ударной волны, пренебрежимо малы [8]; 4) взрыв имитировался сферическим источником, генерирующим ударные волны; 5) соблюдалось условие акустически жесткой стенки. Так же как в работе [9] вычисление значения звукового давления P от сферического источника проводилось методом итерационного пересчета его амплитуды. Расчет амплитуды звукового давления повторялся до тех пор, пока итоговое значение механического напряжения в стенке, которая состоит из фарфора, не превысит $\sigma_{\text{пред.}} = 50$ МПа.

Для определения зависимости амплитуды акустического давления P , от расстояния до места взрыва решалось нестационарное скалярное волновое уравнение (2) в осесимметричной постановке:

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \nabla \left(\frac{-1}{\rho} \nabla P \right) = 0, \quad (2)$$

где ρ — плотность жидкости; c — скорость звука в среде.

Как отмечалось выше, из-за больших разностей акустических сопротивлений соприкасающихся сред, граница раздела воздух–вода рассматривается как аку-

Таблица 1. Параметры фарфоровой емкости (см. рисунок 1) и величины, используемые при расчете.

Характеристика	Значение
L , мм	65
L_1 , мм	56
H , мм	42
δ , мм	3
Коэфф. Пуассона μ	0.19
Модуль Юнга, ГПа	70
ρ , кг/м ³	2350
$\sigma_{\text{пред.}}$, МПа	50

стическая жесткая стенка. В таком случае граничное условие на верхней границе может быть записано как:

$$\begin{aligned} -\mathbf{n} \left(\frac{-1}{\rho} \nabla P \right) &= -\mathbf{n} \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial r} \hat{\mathbf{r}} + \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \hat{\boldsymbol{\varphi}} + \frac{\partial P}{\partial z} \hat{\mathbf{z}} \right) \\ &= -\mathbf{n} \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial r} \hat{\mathbf{r}} + \frac{\partial P}{\partial z} \hat{\mathbf{z}} \right) = 0, \end{aligned}$$

где $\mathbf{n}$ — единичный вектор нормали к поверхности, $\hat{\mathbf{r}}, \hat{\boldsymbol{\varphi}}, \hat{\mathbf{z}}$ — единичные вектора. Из симметрии постановки задачи следует, что:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial r} \right)_{r=0} = 0,$$

а начальные условия имеют вид:

$$P_{t=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right)_{t=0} = 0.$$

При решении принимается, что по мере распространения волнового фронта в жидкости его форма не изменяется и генерируется следующей зависимостью на границе с источником взрыва:

$$P(t) = \begin{cases} P_{\text{амп}} \left[e^{\frac{-\pi^2(t-t_0)^2}{t_0^2}} - e^{-\pi^2} \right], & t \in [0, t_0] \\ 0, & t \geq t_0, \end{cases} \quad (3)$$

здесь t_0 — длительность импульса давления (при расчете принималась равной 3 мкс), $P_{\text{амп}}$ — амплитудное значение давления.

В качестве уравнения состояния для воды использовалась известная связь плотности и давления [10]:

$$p = p_0 + B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right], \quad (4)$$

где p_0 — внешнее давление в системе (10^5 Па); константы B и n определяются из условий:

$$B = \begin{cases} 31 \times 10^7 \text{ Па} & p < 3 \times 10^9 \text{ Па} \\ 42 \times 10^7 \text{ Па} & p > 3 \times 10^9 \text{ Па} \end{cases} \quad \text{и}$$

$$n = \begin{cases} 7.15 & p < 3 \times 10^9 \text{ Па} \\ 6.29 & p > 3 \times 10^9 \text{ Па}. \end{cases}$$

Так как вода является малосжимаемой жидкостью, то разложение плотности ρ в ряд Тейлора в окрестности ρ_0 в уравнении состояния (4) приводит к более простому виду:

$$p - p_0 = \Delta p = Bn \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = Bn \frac{\Delta \rho}{\rho_0}.$$

Принимая во внимание то, что распространение ударной волны в данной постановке, происходит без обмена теплом с окружающей средой, то скорость распространения возмущений в (2) может быть найдена следующим образом:

$$c = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} \approx \sqrt{\frac{\Delta p}{\Delta \rho}} = \sqrt{\frac{Bn}{\rho_0}}$$

Как видно из графика, представленного на рисунке 2, данные расчета $P_{\text{пред.}} \sim 11$ МПа вблизи стенки сосуда ($R = 65$ мм) в пределах принятых допущений качественно согласуются с результатами оценки по соотношению (1), а также свидетельствуют, что давление в области вблизи места взрывной фрагментации жидкометаллической капли достигает значения ~ 100 МПа.

В дальнейшем, с учетом результатов проведенных оценок и с целью предотвращения возможного разрушения рабочей емкости, все последующие опыты по фрагментации жидкометаллических капель, в том числе из свинца, были выполнены при ограниченных (по сравнению с наладочными экспериментами) сверху значениях начальной температуры и массы образцов — 700 °С и 10 г, соответственно.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Опыты были проведены на экспериментальной установке (рисунок 3), в которой использовалась плазменная печь резистивного типа VCG, с предельной температурой нагрева ~ 1100 °С. Эксперименты выполнялись в следующей последовательности. Металлический образец весом 10 г плавился в графитовом тигле. Затем расплавленный металл в форме струи выливался из тигля через направляющую воронку (конус с нормированным выходным отверстием) непосредственно в рабочую ванну — прямоугольную стеклянную емкость объемом $1000 \times 600 \times 600$ мм, наполненную водой комнатной температуры (~ 18 °С). Плавление металла осуществлялось в инертной среде аргона, а его остывание при падении до входа в воду — на воздухе. Для контроля температуры металла в процессе его нагрева и разлива использовалась хромель-алюмелевая термопара, расположенная непосредственно в нагревательном устройстве. По двум боковым стенкам с внешней стороны сосуда располагались видеокамеры, предназначенные для съемки процессов падения и фрагментации расплава. Максимальная скорость видеосъемки составляла 960 кадр/с. Начальные температуры поверхности и внутри объема нагретого образца оценивались по показаниям хромель-алюмелевой термопары. Температура охлаждающей воды измерялась ртутным термометром.

Для измерения импульсов давления применялись пьезоэлектрические датчики Kistler типа 701A. Измерения проводились в программной среде LabView

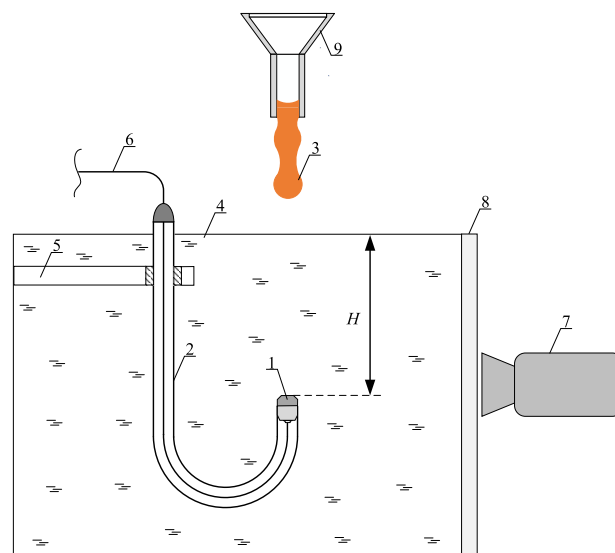


Рисунок 3. Упрощенная схема экспериментальной установки; 1 — пьезодатчик давления, 2 — U-образная трубка для крепления датчика давления, 3 — капля расплава, 4 — вода, 5 — державка на штативе, 6 — вывод на АЦП, 7 — видеокамера, 8 — резервуар с охлаждающей жидкостью, 9 — воронка для формирования струи с нормируемым отверстием.

с использованием вторичной аппаратуры National Instruments. Частота оцифровки сигнала изменялась в диапазоне $(20-250) \times 10^3$ изм./с. Датчик давления полностью погружался в воду на глубину H , равную 75 мм от свободной поверхности жидкости, а нижняя часть фиксировалась в герметичной U-образной трубке, которая в свою очередь закреплялась на специальном штативе с зажимом.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ

Все представленные результаты экспериментов проведены при следующих условиях: масса капли — 10 г; начальное расстояние капли от свободной поверхности — 30 мм; начальная температура капли 700 °С; мембрана чувствительного элемента датчика давления располагалась в воде на расстоянии 75 мм от ее свободной поверхности.

4.1. Опыты с висмутом

При взаимодействии жидкого висмута с водой в подавляющем большинстве случаев взрыв происходит у самой поверхности (рисунок 4). Практически сразу при контакте металла с водой образуется смесь из водяного пара, а также мелкодисперсных игольчатых образований. Большое влияние на процесс фрагментации оказывают, по-видимому, особенности входа каплевидной струи металла в воду. Было установлено, что в некоторых случаях паровой взрыв может происходить при частичном погружении расплава в воду с образованием над ним каверны с воздухом.

Импульсы давления, фиксируемые в воде пьезоэлектрическим датчиком (рисунок 5(a)), имеют относительно небольшую амплитуду (десятки кПа) и сопровождаются значительными звуковыми эффектами. Ввиду вышесказанного, специфическая плоская форма осколков (рисунок 5(b)), образующихся при дроблении

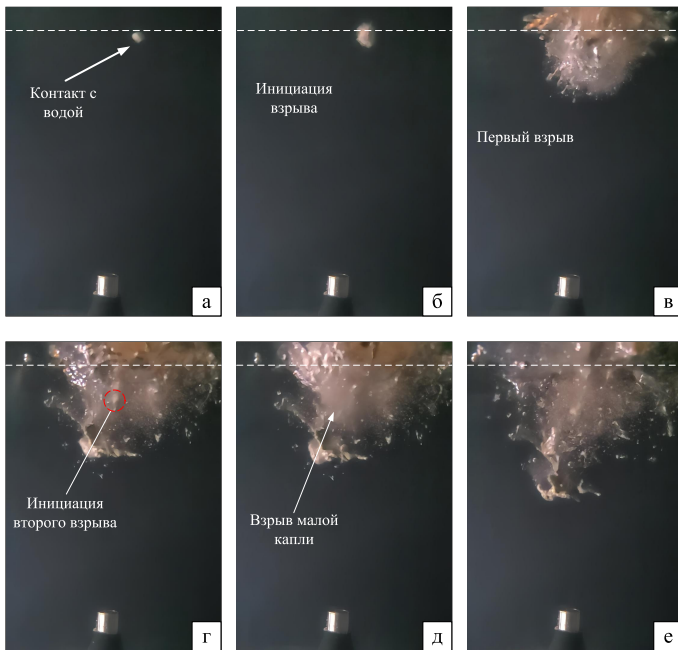


Рисунок 4. Фотографии взрыва капли висмута. Пунктирной линией обозначен уровень свободной поверхности воды. (а) — в момент времени $\tau = 0$ капля входит в воду; (б) — 8 мс, инициация взрыва на поверхности воды; (в) — 15 мс, первый взрыв на поверхности воды; (г) — 50 мс, инициация второго взрыва; (д) — 250 мс, взрыв малой капли; (е) — 265 мс, окончание процесса фрагментации Bi.

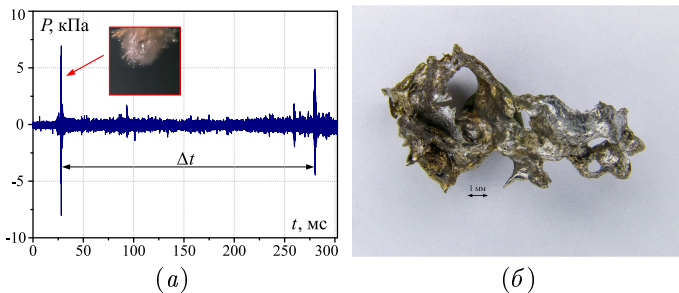


Рисунок 5. (а) — Характерный вид осциллограммы пульсаций давления при фрагментации капли висмута, $\Delta t = 252$ мс; (б) — фотография осколков дробления.

капли, могут быть связаны с особенностями ее взрыва на поверхности охлаждающей жидкости. Варьирование температуры висмута не приводит к значительным изменениям процесса протекания парового взрыва.

4.2. Опыты с оловом

Фрагментация расплава олова существенным образом отличается от процесса дробления висмута. Как показано на рисунке 6, большой итоговый взрыв капли Sn происходит непосредственно в объеме воды и может состоять из нескольких мелких взрывов.

Первоначальный взрыв, триггер, наблюдается на боковой поверхности капли (рисунок 6(б)). Затем возмущение паровой оболочки распространяется по всей поверхности (рисунок 6(в, г)), генерируя скачкообразным образом с миллисекундными интервалами возрастающие по амплитуде импульсы давления (рисунок 7(а)). Далее, как видно на рисунках 6(д, е), на-

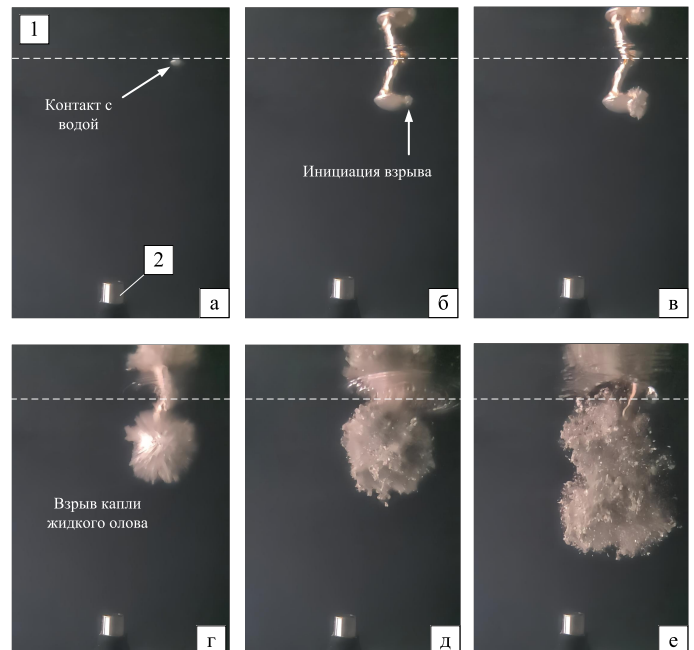


Рисунок 6. Фотографии процесса взрывной фрагментации одиночной капли олова. Пунктирной линией обозначен уровень свободной поверхности воды. 1 — вода, 2 — датчик давления в воде. (а) — в момент времени $\tau = 0$ мс капля входит в воду; (б) — 34 мс, локальная дестабилизация паровой пленки; (в) — 36 мс, распространение возмущения по поверхности капли; (г) — 40 мс, взрыв капли олова; (д) — 44 мс, расширение продуктов фрагментации; (е) — 83 мс, окончание процесса взрывной фрагментации Sn.

блюдается вылет фрагментов расплавленного металла. Можно отметить, что при маломасштабных паровых взрывах с расплавом Sn интенсивность пульсаций больше, по сравнению с расплавом Bi и в наших экспериментах достигала 2×10^6 Па (рисунок 7(а)). При повышении температуры вливаемого металла четко прослеживается тенденция к повышению амплитуды импульсов давлений.

Другая важная отличительная особенность фрагментации Sn заключается в том, что в случае наличия взрыва даже небольшой интенсивности, продукты тонкой фрагментации имеют сложную пористую ячеистую структуру типа “honeycomb” (рисунок 7(б)), которая описана ранее в работе [11].

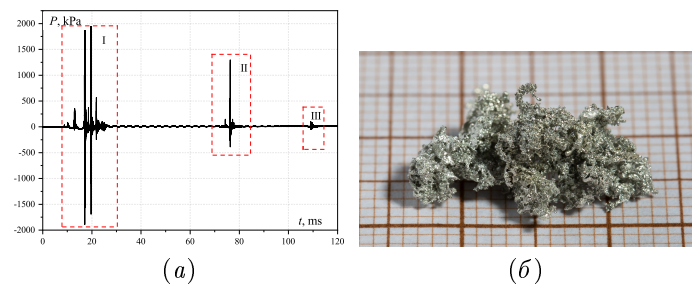


Рисунок 7. (а) — Характерный вид осциллограммы пульсаций давления в воде при взрыве единичной оловянной капли расплава при $T = 700$ °C, $m = 10$ г; возникающие амплитудные значения давления I — $P \sim 2$ МПа, II — $P \sim 1.3$ МПа, III — $P \sim 0.1$ МПа; (б) — фотография осколков дробления.

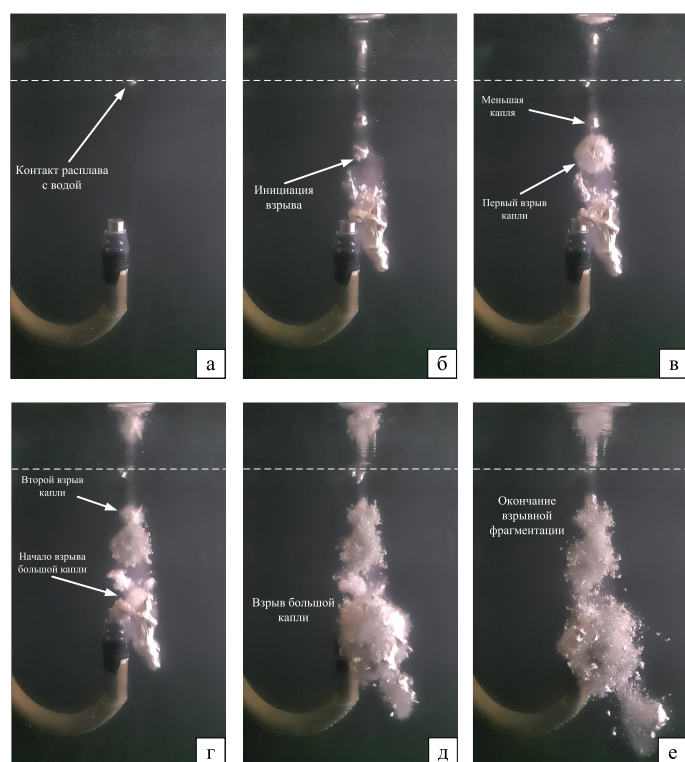


Рисунок 8. Фотографии процесса последовательной взрывной фрагментации нескольких капель олова. (а) — в момент времени $\tau = 0$ мс капля входит в воду; (б) — 100 мс, инициация первого взрыва, (в) — 103 мс, взрыв первой капли; (г) — 105 мс, взрыв второй капли; (д) — 112 мс, взрыв большей материнской капли; (е) — 131 мс, окончание взрывной фрагментации Sn.

В опытах также наблюдалось, что в процессе погружения в жидкость первичная капля олова распадается на несколько падающих друг за другом жидких фрагментов (рисунок 8), которые взрываются в определенной последовательности. Подобные наблюдения подтверждают предположение о возможном инициировании спонтанного парового взрыва от случайного взрывного распада одной капли [12, 13].

4.3. Опыты со свинцом, цинком, алюминием, сплавами Розе (25%Sn-25%Pb-50%Bі) и Вуда (12,5%Sn-25%Pb-50%Bі-12,5%Сd)

Типичный вид осциллограммы давления, сопутствующей процессу взрывной фрагментации свинца, а также фотографии образующихся осколков представлены на рисунке 9.

Специфика представленных результатов по взаимодействию расплавленного свинца с водой, полученных для капли массой 10 г в температурном интервале 400–800 °С, состоит том, что в отличие от более ранней работы [14], наблюдаемые нами паровые взрывы по сравнению с оловом имеют малую интенсивность и слабо дробятся. Поскольку в работе [14] использовались капли свинца с большей массой (> 20 г) и температурой выше 900 °С, то можно предположить, что интенсивность паровых взрывов свинцовых капель, а также степень их фрагментации существенно увеличивается с ростом значений массы и температуры.

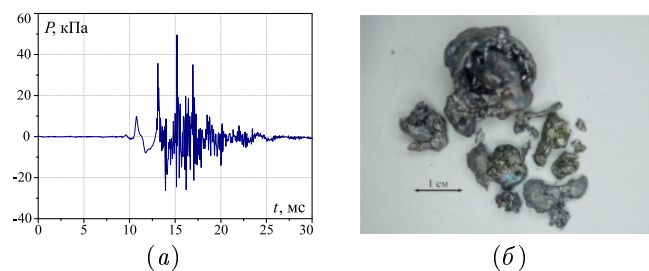


Рисунок 9. (а) — Характерный вид осциллограммы пульсаций давления при фрагментации капли свинца; (б) — фотография осколков дробления.

Результаты экспериментов с каплями цинка и алюминия свидетельствуют об отсутствии фрагментации расплавов этих металлов (рисунок 10) и фиксации каких-либо существенных значений импульсов давления. Вопрос о причинах отсутствия подобных эффектов требует дальнейшего более тщательного рассмотрения.

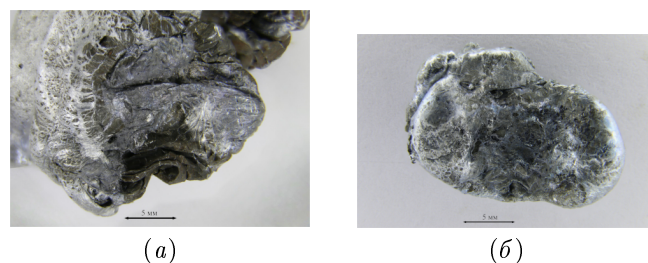


Рисунок 10. Фотографии фрагментов (а) — алюминий; (б) — цинк.

Результаты исследования фрагментации сплавов на основе висмута свидетельствуют о схожести процесса их дробления и форм образующихся осколков с данными, полученными на чистом висмуте.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны результаты серии экспериментов по изучению особенностей фрагментации падающих в холодную воду капель горячих расплавов Sn, Bi, Pb, а также жидких сплавов на основе висмута (сплавы Розе и Вуда) при их попадании в воду комнатной температуры. Представленные опытные данные получены в условиях постоянных значений начальной температуры капель 700 °С и их веса 10 г. Установлено, что, несмотря на маломасштабность проведенных опытов, импульсы давления, которые генерируются при взрывной фрагментации капель, могут достигать значений, способных вызвать разрушение рабочих сосудов. Поэтому подобные эксперименты необходимо проводить с чрезвычайной осторожностью.

Получены оригинальные зависимости пульсаций давления от времени, которые совместно с анализом индивидуальных структур итоговых фрагментов дробления позволяют уточнить возможные сценарии и особенности взаимодействия различных жидких металлов с водой при паровых взрывах.

Показано, что взрыв олова, который может сопровождаться импульсами давления свыше 2×10^6 Па, происходит при полном погружении капли в воду, в то время как для расплава висмута характерен взрыв только

на поверхности. В рассматриваемом интервале температур жидкий свинец практически не подвержен взрывной фрагментации. Представленные результаты свидетельствуют о недостаточной обоснованности использования опытных данных, полученных на легкоплавких металлах, для объяснения механизма фрагментации расплавленного корнума атомного реактора.

Было подтверждено, что взрывное разрушение отдельной капли может быть триггером спонтанного парового взрыва.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам ОИВТ РАН О.А. Синкевичу, К.Г. Кубрикову, Д.А. Виноградову за помощь в проведении опытов и обсуждению полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00270-24-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Е В Физические аспекты явления парового взрыва *Препринт* (Москва: Институт атомной энергии)
2. Fletcher D F and Theofanous T G 1997 Heat transfer and fluid dynamic aspects of explosive melt–water interactions *Advances in Heat Transfer* vol 29 (San Diego: Academic Press)
3. Ефанов А Д, Загорюлько Ю Н, Ремизов О В, Козлов Ф А, Сорокин А П и Богатырев И Л 1997 *Теплоэнергетика* **8** 17–24
4. Berthoud G 2000 *Annual Review of Fluid Mechanics* **32** 573–611
5. Мелихов В И, Мелихов О И и Якуш С Е 2020 *Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов* (Москва: Издательство «ИПМех РАН»)
6. Писаренко Г С, Яковлев А П и В Матвеев В 1988 *Справочник по сопротивлению материалов* (Киев: Наукова Думка)
7. Григорьев И С и Мейлихов Е З (ред.) 1991 *Физические величины: Справочник* (Москва: Энергоатомиздат)
8. Кедренский В К (ред.) 2000 *Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели* (Новосибирск: Издательство СО РАН)
9. Ivochkin Yu, Koveshnikov K, Kubrikov K, Sinkevich O, Teplyakov I, Yudin S and Vinogradov D 2023 *E3S Web Conf.* **459** 04022
10. Кобылкин И Ф, Селиванов В В, Соловьев В С и Сысоев Н Н (ред.) 2004 *Ударные и детонационные волны. Методы исследования* (Москва: ФИЗМАТЛИТ)
11. Wang C 2021 *International Journal of Heat and Mass Transfer* **166** 120782
12. Клименко А В, Вавилов С Н, Васильев Н В и Зейгарник Ю А 2022 *Доклады Академии Наук* **503** 13–16
13. Вавилов С Н, Васильев С Н, Зейгарник Ю А, Клименко А В и Скибин Д А 2022 *Теплоэнергетика* **7** 15–22
14. Ивочкин Ю П, Бородин Т И, Казаков А Н и Тепляков И О 2020 *Тепловые процессы в технике* **12**(3) 136–142