

Study of Some Features of Explosive Fragmentation of Liquid Bismuth during its Contact with Water

Yu. P. Ivochkin¹, S. M. Yudin^{1,2}

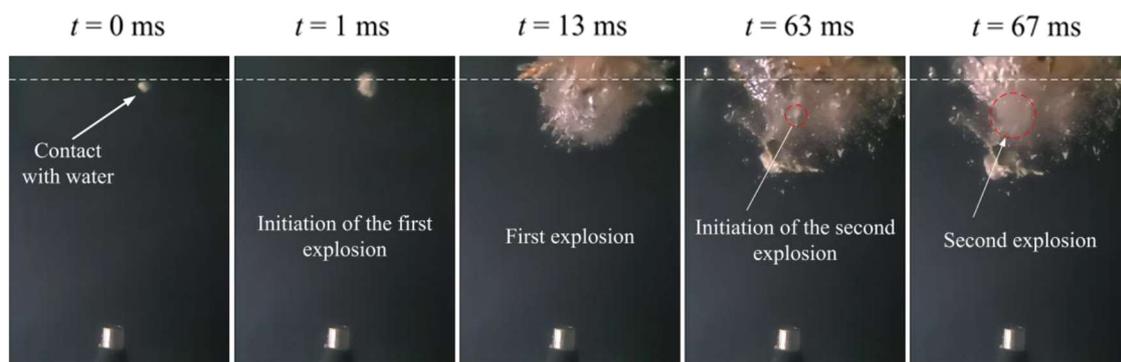
¹Joint institute for High Temperatures of Russian Academy of Science,
Moscow, 125412, Russia

²National Research University "Moscow Power Engineering Institute",
Moscow, 111250, Russia
stepex@jiht.ru

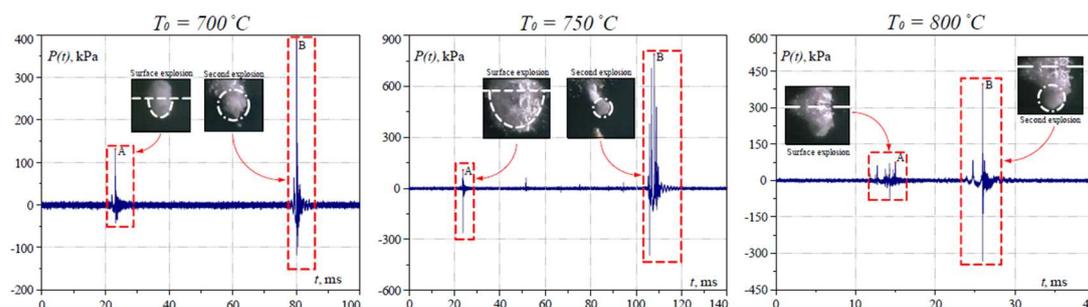
Abstract

The paper presents results of an experimental study on the explosive interaction of 3 g and 10 g droplets and jets of molten bismuth with water within a range of initial melt temperatures $T_0 = 600 - 800$ °C. High-speed video recording revealed that explosive (process duration less than 1 ms) breakup of liquid bismuth droplets occurs both upon contact with the free surface of the coolant under conditions of partial submersion in water, as well as within the bulk volume. Analysis of measured pressure oscillations in the water medium showed no dependence of their amplitude on the initial temperature or mass of the droplet. Numerical simulations and experimental results indicate higher values of pressure and acoustic energy generated during underwater explosions of bismuth droplets compared to explosions at the surface.

Keywords: steam explosion, vapor explosion, FCI (fuel coolant interaction), melted droplet, fragmentation



Development of a surface steam explosion for a liquid bismuth droplet at $T_0 = 650$ °C and $m_{drop} = 10$ g; the dashed line indicates the level of the water free surface



Pressure oscillograms during sequential surface and explosive fragmentation of bismuth with $m_{drop} = 3$ g at different initial temperatures T_0

УДК 536.423, 621.039

Исследование особенностей взрывной фрагментации жидкого висмута при его падении в воду

Ю. П. Ивочкин¹, С. М. Юдин^{1,2}

¹ *Объединенный институт высоких температур РАН,
Россия, Москва, 125412, Ижорская ул. д.13*

² *Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Россия, Москва, 111250, Красноказарменная ул., д.14
stepex@jiht.ru*

Аннотация

В работе представлены результаты исследования процессов взрывного взаимодействия капель и струй расплавленного висмута массой 3 г и 10 г с водой в интервале значений начальных температур расплава $T_0 = 600 \div 800^\circ \text{C}$. С помощью скоростной видеосъемки установлено, что взрывное (длительность процесса менее 1 мс) разрушение капли жидкого висмута наблюдается как при контакте со свободной поверхностью охладителя в условиях ее частичного погружения в воду, так и в объеме. Анализ измеренных пульсаций давления в водной среде показал отсутствие зависимости их амплитуды от начальных значений температуры и массы капли. Результаты численных расчетов и экспериментов указывают на большие значения давления и акустической энергии, которые генерируются при подводном взрыве капель висмута, по сравнению со взрывами на поверхности.

Ключевые слова: паровой взрыв, взрывная фрагментация, расплав, дробление

1. Введение

При взаимодействии высокотемпературного металлического расплава с низкокипящим охладителем (например, с водой), возможна генерация парового взрыва (ПВ) – опасного и непредсказуемого теплофизического явления, характеризующегося стремительной генерацией пара высокого давления и температуры [1–4]. В атомной энергетике ПВ могут быть вызваны соприкосновением охлаждающей воды с горячим кориумом, который образуется при плавлении элементов активной зоны поврежденного реактора. Данный феномен также теоретически может наблюдаться при разгерметизации контура с жидкометаллическим теплоносителем.

Паровые взрывы исследуются как на крупномасштабных стендах [5], максимально приближенным к промышленным условиям, так и на маломасштабных лабораторных установках, предназначенных для детального изучения различных этапов этого явления. Для последнего случая характерно, в частности, исследование этапа фрагментации, сопутствующего процессу падения в воду отдельных капель или струй горячего жидкометаллического расплава, масса которого, как правило, не превышает нескольких десятков грамм. При проведении маломасштабных паровых взрывов обычно используются специальные имитаторы расплава, в качестве которых применяют различные легкоплавкие металлы и их сплавы [6–8].

Исследования причин дробления горячих жидкометаллических капель при их взаимодействии с охладителем интенсивно проводятся во многих развитых странах, начиная с середины прошлого столетия [9–11] вплоть до настоящего времени [12–16]. Однако, несмотря на многолетнюю историю, механизм этого физического явления изучен недостаточно полно,

в частности, из-за ограниченности объема имеющейся достоверной экспериментальной информации. Кроме того, вопрос о правомерности использования низкоплавких металлов в качестве имитаторов кориума также остается открытым, поскольку имеет место существенное различие процессов взаимодействия разных материалов с водой при их взрывной фрагментации.

В рамках настоящего исследования рассматриваются особенности процесса взаимодействия капель расплавленного висмута с водой, приводящего к маломасштабному паровому взрыву. Выбор висмута в качестве модельного вещества обусловлен относительной простотой проведения опытов с этим материалом, а также его использованием в составе свинцово-висмутовой эвтектики — перспективного теплоносителя для реакторных установок на быстрых нейтронах [17–19].

2. Описание экспериментальной установки

Экспериментальное исследование процесса взрывной фрагментации жидкого висмута проводилось по методике, которая использовалась ранее во многих работах [20–23]. В них горячие капли расплавленного металла с заранее определенными массами и начальной температурой падали в емкость, заполненную охладителем, обычно, дистиллированной водой. Упрощенная схема установки, на которой были проведены опыты, показана на рис. 1. Датчик давления совместно с изолированными от охладителя соединительными проводами крепился на торце державки (полый металлической трубки U-образной формы) таким образом, что мембрана – чувствительный элемент преобразователя, была ориентирована параллельно дну емкости. Подобная конструкция позволила с меньшими искажениями, по сравнению с датчиками, размещенными на боковых стенках сосуда, измерять импульсы давления. Державка с датчиком была полностью погружена в воду, заполняющую прямоугольный резервуар с прозрачными стенками размером $1000 \times 600 \times 600 \text{ мм}^3$. Расстояние между мембраной пьезодатчика и свободной поверхностью постоянно и составляло 75 мм.

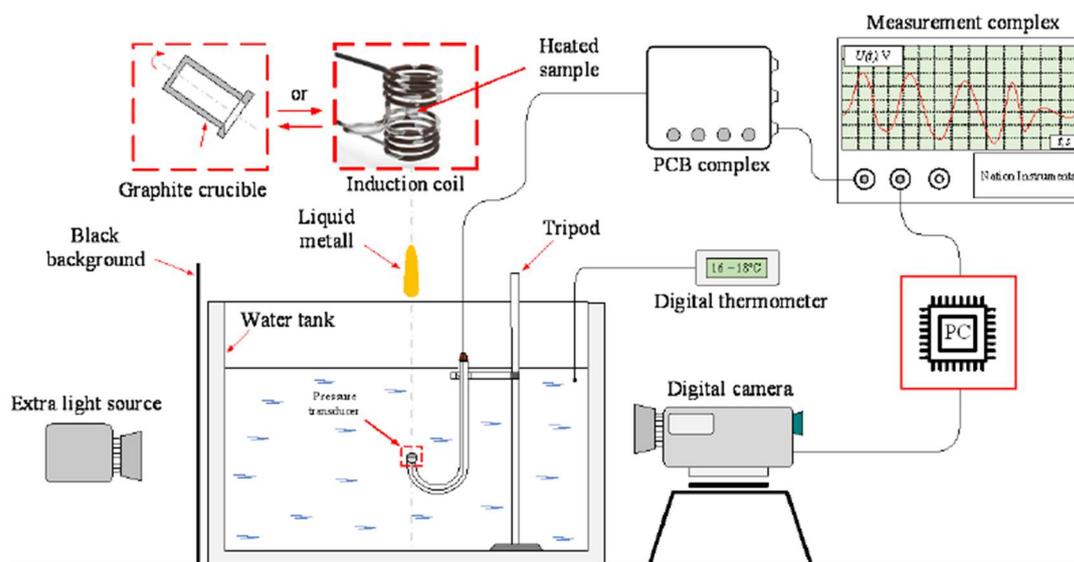


Рис. 1. Упрощенная схема экспериментальной установки

Для регистрации импульсов давления, также как в работах [24,25], использовались датчики пьезоэлектрического типа двух марок: Kistler типа 701A (резонансная частота $\sim 70 \text{ кГц}$) в связке с усилителем зарядов типа 5037B1, а также РСВ, модель HSM 113A28 (резонансная частота выше 470 кГц) совместно с блоком формирования сигнала типа РСВ 482A22. Через усилитель заряда датчик подключался к измерительному комплексу Nation Instruments, состоящему из крейта PXI-1001 со вставленными в него платами АЦП PXI-6070E и

осциллографа РХИ-5122. Измерения осуществлялись в программной среде LabView при различных (от 20 до 700 кГц) частотах оцифровки аналогового сигнала. Скорость съемки составляла 960 кадр/сек с экспозицией не более 1 мс.

Плавление металлических образцов осуществлялось двумя способами – с помощью левитационной плавки в полости индуктора, и с помощью резистивного нагрева внутри графитового тигля. В первом случае металлический образец массой m_{drop} подвешивался и нагревался в высокочастотном (60 кГц) неоднородном магнитном поле. Температура поверхности образца контролировалась с помощью оптического пирометра типа AvaSpec-3648 с последующей обработкой в координатах Вина. После нагрева образца до требуемой температуры, которая выше точки плавления его материала, индукционная система отключалась от питания, и сформировавшаяся капля расплава падала в воду.

При втором способе нагрева образцов применялась плавильная печь резистивного типа VCG мощностью $W = 0.85$ кВт и с предельной температурой нагрева $\sim 1200^\circ\text{C}$. Плавка осуществлялась в инертной среде аргона, так и на воздухе. Для контроля температуры металла в процессе его нагрева использовалась хромель-алюмелевая термопара, расположенная непосредственно в нагревательном устройстве. Верхний предел рабочего диапазона начальной температуры расплава T_0 составлял 800°C , что обусловлено безопасностью проведения опытов. Температура воды поддерживалась на постоянном уровне 18°C .

3. Результаты эксперимента

Опыты, выполненные двумя описанными выше способами плавления, дали схожие результаты. Было установлено (рис. 2), что при падении жидкого висмута в воду в подавляющем большинстве случаев его взрыв происходит на поверхности раздела воздух – жидкость, без глубокого погружения в охладитель. В наших экспериментах за время менее 1 мс, а в [26] за время ~ 0.5 мс, после контакта металла с водой на нижней части погруженной капли образуется область локального взрывного вскипания. Данная особенность четко прослеживается для начальной температуры расплава $T_0 = 600 \div 650^\circ\text{C}$. При достижении температуры $T_0 = 700^\circ\text{C}$ паровая пленка, окружающая каплю, приобретает большую устойчивость, в результате чего расплав без взрывной фрагментации может полностью или частично погрузиться в объем охладителя (рис. 3).

На рис. 4 показано изменение максимальных значений давления P_{max} в момент взрыва жидкой капли от начальной температуры висмута T_0 . Экспериментальные данные демонстрируют отсутствие четкой связи между этими величинами.

Для устранения эффекта предварительного дробления капли до момента контакта с водой и непосредственно при ее движении в воде, опыты проводилось для $m_{drop} = 3$ гр.

Было установлено, что при $T_0 = 700^\circ\text{C}$ первичный контакт поверхности горячей капли и воды в этом случае не приводит к поверхностной фрагментации (рис. 5).

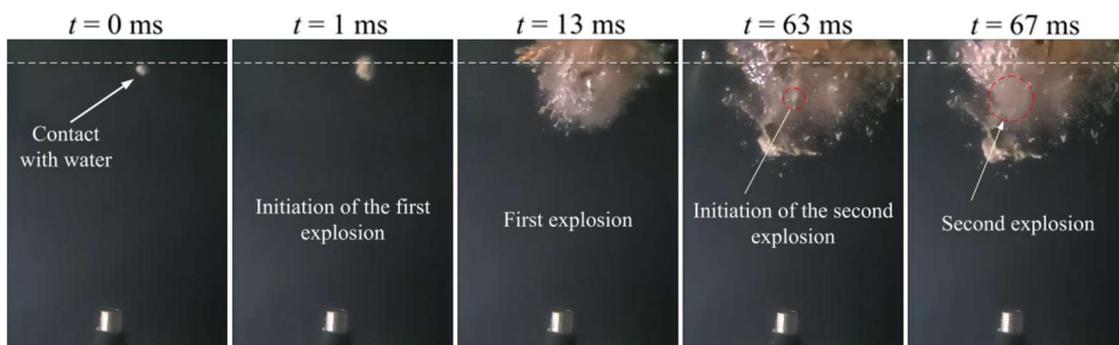


Рис. 2. Развитие поверхностного парового взрыва для капли жидкого Вi при $T_0 = 650^\circ\text{C}$ и $m_{drop} = 10$ гр; пунктирной линией обозначен уровень свободной поверхности воды

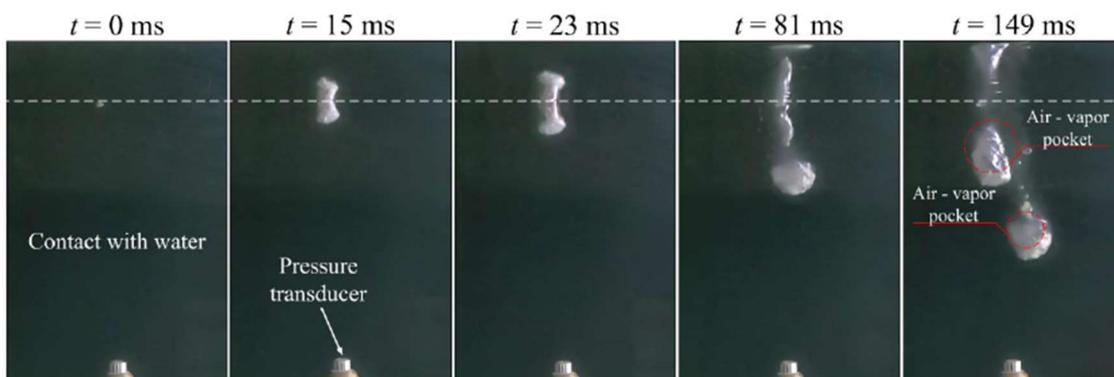


Рис. 3. Развитие паровоздушной пленки на поверхности капли Вi $m_{drop} = 10$ гр и $T_0 = 700^\circ\text{C}$ при ее движении в охлаждающей воде; пунктирной линией обозначен уровень свободной поверхности воды

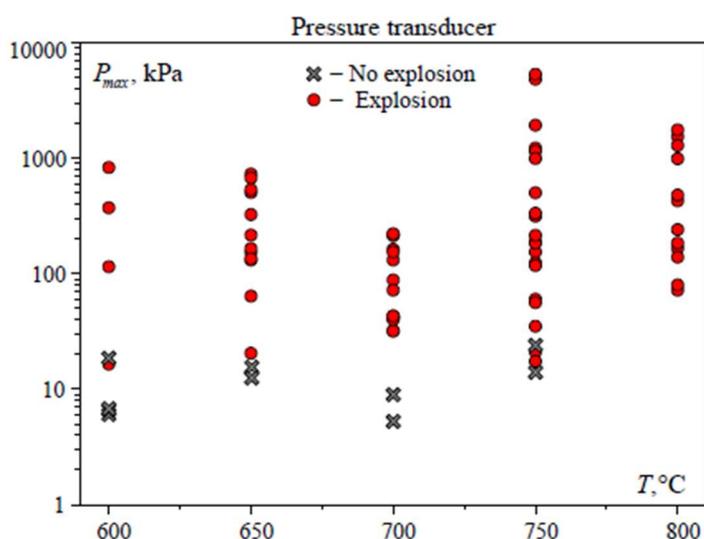


Рис. 4. Амплитудные значения давления, генерируемые в процессе взрывной фрагментации капли висмута $m_{drop} = 10$ гр при различных начальных температурах расплава T_0

Движение металла в воде сопровождается образованием в кормовой области капли каверны с воздухом, а на ее нижней части возникает ($t = 37$ мс на рис. 5) локальный контакт охлаждающей жидкости с горячей поверхностью. Образующееся в лобовой части возмущение развивается за время $t \approx 1$ мс и впоследствии приводит к взрывному разрушению всей капли. Стоит отметить, что при подобном сценарии верхняя часть деформировавшейся капли металла не контактирует с водой, т.е. подобный случай эквивалентен взрыву на поверхности воды.

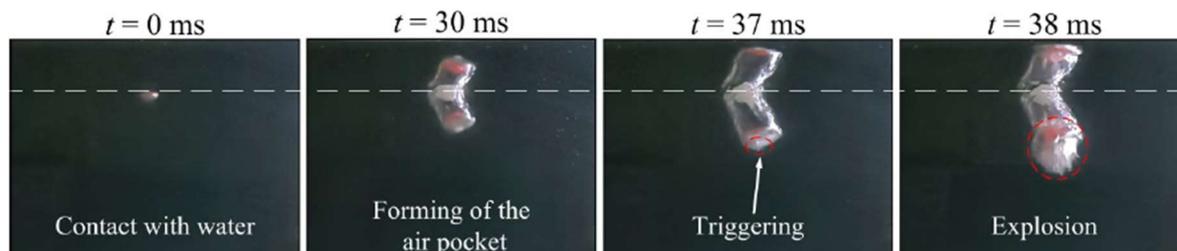


Рис. 5. Вход капли висмута в воду с образованием воздушной каверны в ее кормовой части и последующего единичного прямого контакта двух теплоносителей

Пиковые значения давления P_{\max} при взрыве жидкой капли массой 3 гр в зависимости от T_0 представлены на рис. 6. С помощью скоростной видеокамеры были сопоставлены полученные экспериментальные значения давления с местом возникновения фрагментации жидкой капли, что позволило разделить друг от друга взрыв на поверхности и в объеме охлаждающей воды. Как видно из рис. 6, а) давления, соответствующие поверхностной фрагментации, практически не зависят от начальной температуры капли. Большие давления соответствуют взрывам, протекающим полностью под водой на различных расстояниях от мембраны пьезодатчика. Чаще всего возникновение подобного взрыва вызвано отделением более мелкой капли висмута от исходной (материнской) капли в результате первичного поверхностного взрыва.

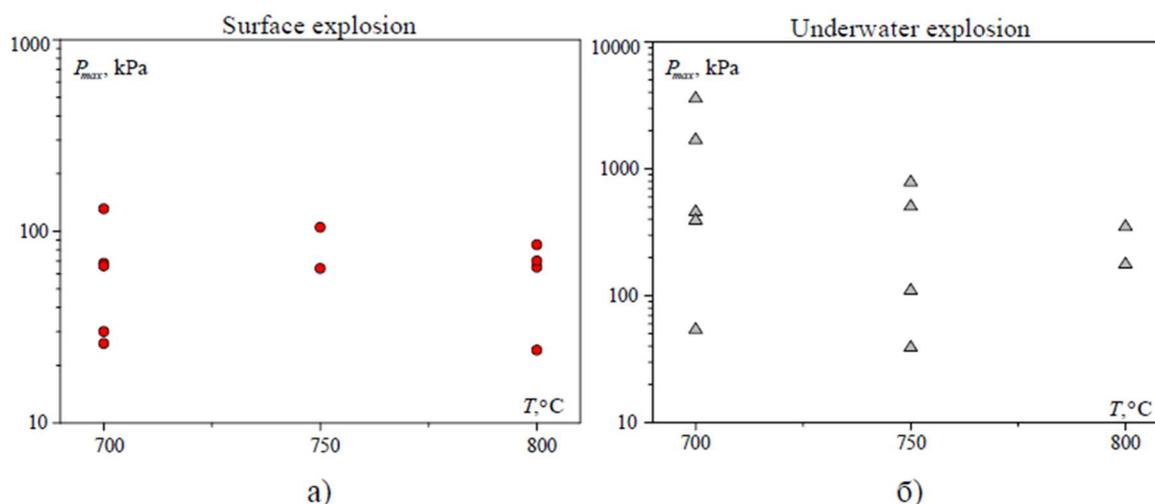


Рис. 6. Амплитудные значения давления, генерируемые в процессе взрывной фрагментации капли висмута $m_{drop} = 3$ гр: а) на поверхности, б) в объеме при различных начальных температурах расплава T_0

Согласно рис. 6, б) можно предположить, что при повышении T_0 расплава происходит падение амплитуд давления, однако это не соответствует действительности. Возникновение последующей взрывной фрагментации в объеме не может контролироваться в ходе эксперимента, поскольку полученные результаты относятся к случайным каплям разной массы и разной температуры в момент взрыва и не отражают реальную связь между амплитудой давления подводного взрыва с начальной температурой жидкого металла. Ниже будет представлен более точный анализ генерируемых давлений, учитывающий индивидуальные особенности взрыва: расстояние от места фрагментации до мембраны датчика, размер области взрыва, а также его длительность.

4. Результаты численных оценок

Экспериментально были установлены эпизоды последовательной взрывной фрагментации расплава на поверхности и полностью под водой. На рис. 7 приведены соответствующие такому сценарию осциллограммы давления для трех различных начальных температур капли T_0 .

Произведем оценку импульсных значений давления, генерируемых непосредственно вблизи места взрыва для трех случаев последовательной фрагментации, представленных на рис. 7. Результаты видеосъемки свидетельствуют о форме области взрыва близкой к сферической. В данной постановке полагалось, что пульсации давления генерируются сферическими источниками.

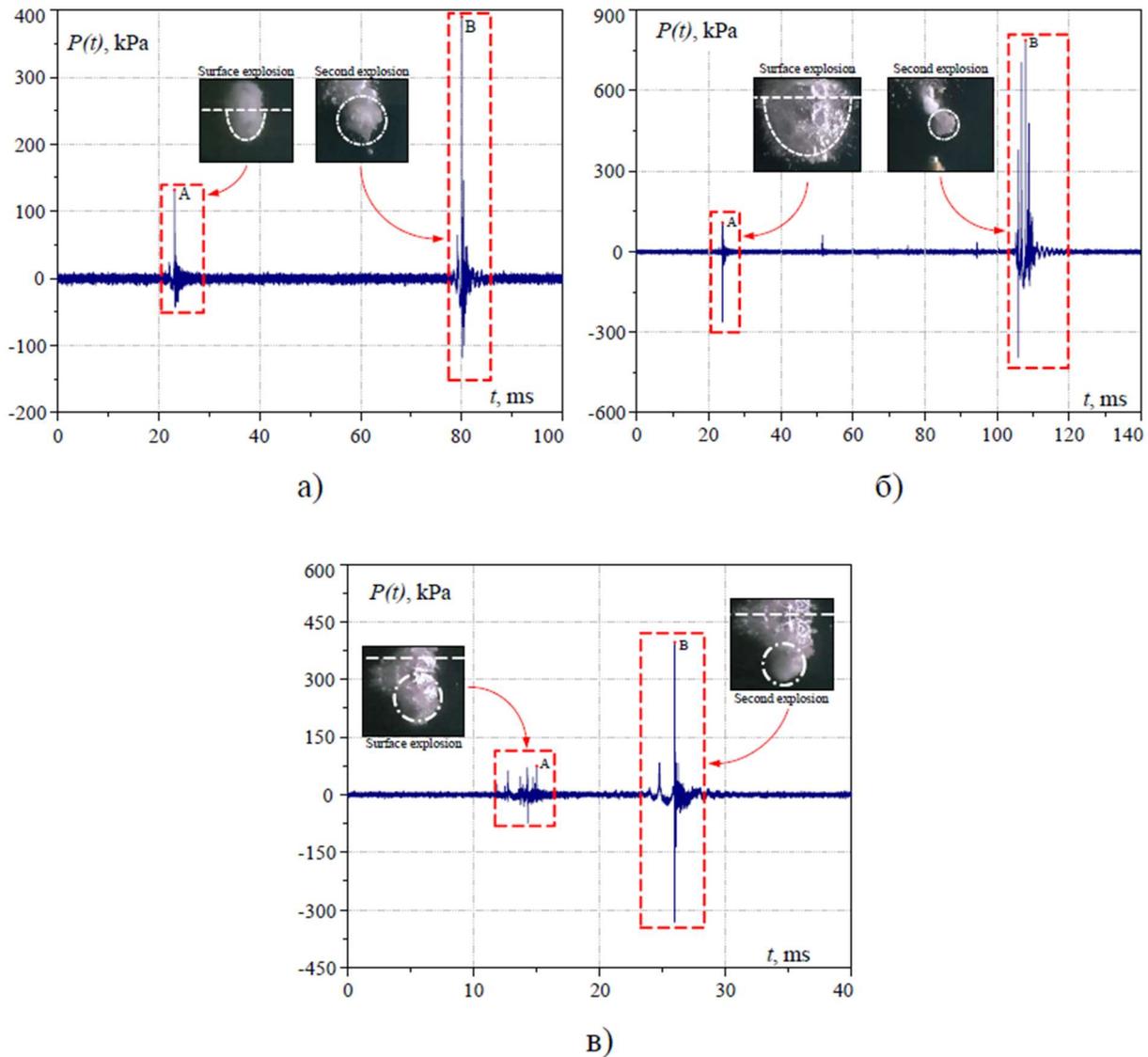


Рис. 7. Осциллограммы давления при последовательной взрывной фрагментации Вi на поверхности и в объеме воды для капли $m_{drop} = 3$ гр; а) $T_0 = 700^\circ \text{C}$, б) $T_0 = 750^\circ \text{C}$, в) $T_0 = 800^\circ \text{C}$

Динамика распространения импульса от источника производится путем решения задачи с использованием акустического приближения [27–29], согласно которому пространственно – временная эволюция импульса давления P описывается волновым уравнением вида:

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

где ρ , c – плотность и скорость звука в воде соответственно. Задача рассматривалась в осесимметричной постановке в цилиндрической системе координат. Основные параметры, такие как расстояние от мембраны пьезодатчика L до области взрыва, радиус сферы взрыва R , длительность наибольшего акустического импульса каждом из волновых пакетов Δt , а также пиковое значение, фиксируемое датчиком $P_0(L)$, соответствующие точкам А и В на рис. 7, сведены в таблицу 1. Наибольший импульс давления имитировался пиком треугольной формой с максимальным значением давления P_0 и длительностью Δt .

Таблица 1

Параметры для решения акустической задачи

| $T_0, ^\circ\text{C}$ | Тип взрыва | $L, \text{мм}$ | $R, \text{мм}$ | $\Delta t, \text{мкс}$ | $P_0(L), \text{кПа}$ |
|-----------------------|---------------|----------------|----------------|------------------------|----------------------|
| 700 | подводный | 38 | 6.5 | 8 | 391 |
| | поверхностный | 61 | 11 | 9 | 131 |
| 750 | подводный | 14 | 6 | 23 | 785 |
| | поверхностный | 53 | 17.5 | 6 | 106 |
| 800 | подводный | 48 | 5.5 | 7 | 394 |
| | поверхностный | 58 | 8.5 | 7 | 70 |

В качестве уравнения состояния воды для учета небольшой сжимаемости воспользуемся уравнением ударной адиабаты в форме Тэтта

$$P(\rho) = P_{amb} + B \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right), \quad (2)$$

где P_{amb} – давление в окружающей жидкости; $\rho_0 = \rho(P_{amb})$, а параметры B и n определяются из условий

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

$$n = \begin{cases} 7,15, & P < 3 \times 10^9 \text{ Па}, \\ 6,29, & P > 3 \times 10^9 \text{ Па} \end{cases}$$

Скорость звука принималась постоянной, изотропной и составляла $c = 1481 \text{ м/с}$.

Результаты численных расчетов представлены на рис. 8. Паровые взрывы, происходящие в объеме воды после первичной взрывной фрагментации капли на поверхности, демонстрируют бóльшую амплитуду давлений по сравнению с первым взрывом на границе раздела вода – воздух, несмотря на уменьшение общей массы вторичных капель относительно массы исходной капли. Если ограничиться рассмотрением только тех точек, которые соответствуют стадии первичной фрагментации (см. рис. 4), можно ожидать уменьшение разброса пиковых значений давления.

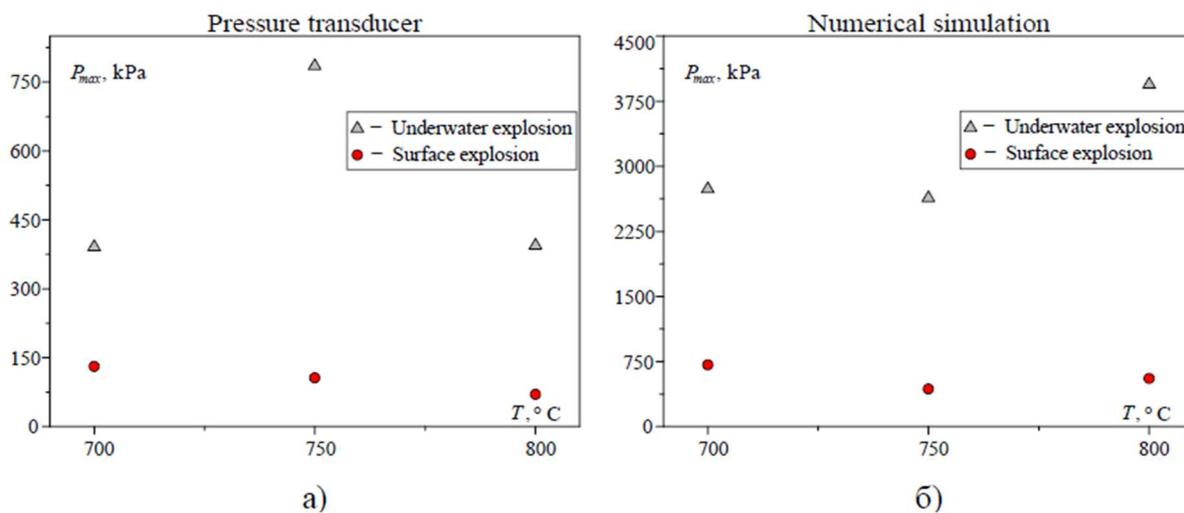


Рис. 8. Амплитудные значения давления, генерируемые в процессе взрывной фрагментации капли висмута $m_{drop} = 3 \text{ гр}$ при различных начальных температурах капли T_0 : а) показания датчика давления; б) результаты расчета вблизи места взрыва

Индивидуальные особенности каждого из волновых пакетов двух последовательных взрывов учитываются при анализе их энергии, определяемой как энергия акустического импульса E_a [30, 31]

$$E_a = \frac{1}{2\rho c^2} \int_V (P(t))^2 dV \quad (3)$$

Расходящаяся от источника волна обладает сферической симметрией, тогда справедливо

$$dV = d\left(\frac{4\pi L^3}{3}\right) = 4\pi L^2 dL \quad (4)$$

Расстояние, пройденное волной за время t , движущейся со скоростью звука, определяется как $L = c \cdot t$. В таком случае, из (3) и (4) окончательная формула для расчета акустической энергии:

$$E_a = \frac{2\pi L^2}{\rho c} \int_0^\tau (P(t))^2 dt \quad (5)$$

Максимальная запасенная тепловая энергия E_{\max} , которой может обладать капля расплава массой m_{drop} может быть определена как

$$E_{\max} = m_{drop} \left(\int_{T_1}^{T_0} C_p(T) dT + r_{melt} \right), \quad (6)$$

где T_1 — температура металла в твердом состоянии; $C_p(T)$ — удельная изобарная теплоемкость как функция температуры; r_{melt} — удельная теплота плавления металла. Тогда доля μ акустической энергии, выделяемой при взрыве, относительно максимальной

$$\mu = \frac{E_a}{E_{\max}} \quad (7)$$

Результаты расчета E_a и μ для трех разных T_0 представлены на рис. 9.

Результаты расчета акустической энергии указывают, что вторичная взрывная фрагментация более мелких капель, происходящая полностью под водой, может сопровождаться на порядок большим выделением энергии по сравнению с дроблением на поверхности охладителя. Однако в обоих случаях выделяется лишь незначительная часть изначально запасенной в исходной капле энергии E_{\max} . Основные потери происходят в результате интенсивного остывания капли в результате кипения воды на ее поверхности, а также охлаждения продуктов фрагментации после процесса кристаллизации.

4. Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение особенностей взаимодействия жидкой капли висмута массой 10 и 3 гр в интервале начальной температуры расплава $600 \div 800^\circ \text{C}$ с холодной водой. Установлено, что при температурах $600 \div 700^\circ \text{C}$ разрушение жидкой капли происходит на свободной поверхности охладителя за время менее 1 мс. Увеличение начальной массы расплава m_{drop} и T_0 не приводит к увеличению пиковых значений давления, генерируемых в процессе взрывной фрагментации. Согласно результатам численных расчетов, высокие значения давления соответствуют подводным взрывам вторичных и последующих более мелких капель, отделившихся от материнской в результате первичной фрагментации. Взрывы в объеме воды обладают большей интенсивностью по сравнению со взрывами на поверхности, однако выделяемая при этом акустическая энергия импульса составляет лишь незначительную часть относительно изначально запасенной в капле тепловой энергии E_{\max} .

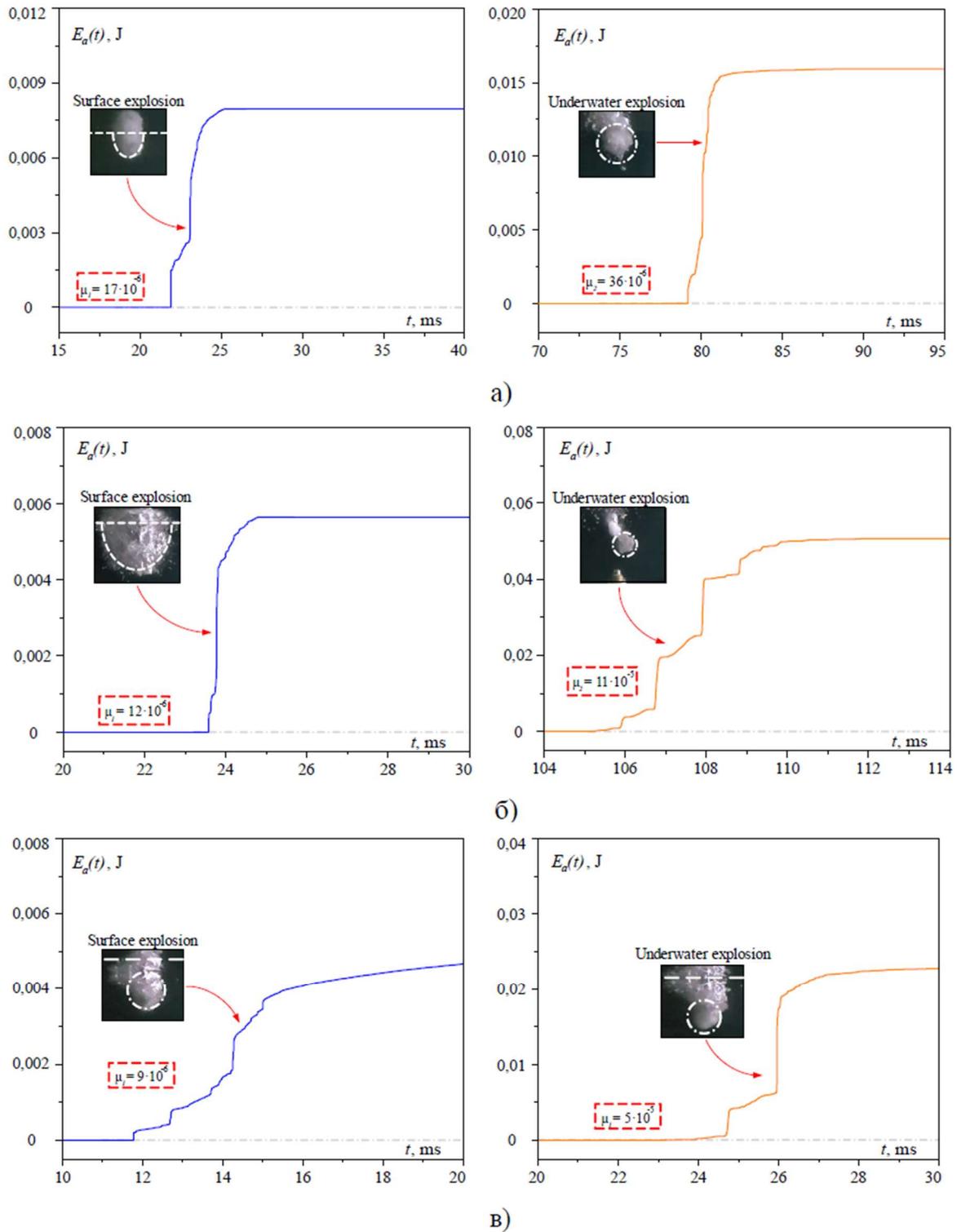


Рис. 9. Зависимости акустической энергии $E_a(t)$ для поверхностного и подводного взрывов капли $m_{drop} = 3$ гр, в соответствии с осциллограммами давления на рис. 7; а) $T_0 = 700^\circ\text{C}$, б) $T_0 = 750^\circ\text{C}$, в) $T_0 = 800^\circ\text{C}$

Благодарности и ссылки на гранты

Авторы работы выражают благодарность сотрудникам ОИВТ РАН Синкевичу О.А., Ковешникову К.С. и Полякову П.И. за помощь в проведении экспериментов и обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Государственное задание № 075-00269-25-00).

Литература

1. Berthoud G. Vapor explosions // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2000. Vol. 32. No. 1. Pp. 573–611. doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.573
2. Мелихов В. И., Мелихов О. И., Якуш С. Е. Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов. М.: ИПМех РАН, 2020. 276 с.
3. Melikhov V. I., Melikhov O. I., Yakush S. E. Thermal interaction of high-temperature melts with liquids // *High Temperature*. 2022. Vol. 60. No. 2. Pp. 252–285. doi.org/10.1134/S0018151X22020274
4. Fletcher D. F., Theofanous T. G. Heat transfer and fluid dynamic aspects of explosive melt–water interactions // *Advances in heat transfer*. 1997. Vol. 29. Pp. 129–213. doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70185-0
5. Shen P., Zhou W., Cassiaut-Louis N., Journeau C., Piluso P., Liao Y. Corium behavior and steam explosion risks: A review of experiments // *Annals of Nuclear Energy*. 2018. Vol. 121. Pp. 162–176. doi.org/10.1016/J.ANUCENE.2018.07.029
6. Ivochkin Y. P., Yudin S. M., Borodina T. I. Specific Features of the Breakup of Hot Liquid Metal Droplets Falling into Cold Water // *Technical Physics*. 2024. Vol. 69. No. 10. Pp. 2517–2526. doi.org/10.1134/S1063784224700828
7. Deng Y., et al. An Experimental study on steam explosion of multiple droplets in different chemical solutions // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2024. Vol. 226. P. 125477. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125477
8. Vavilov S. N., Vasil'ev N. V., Zeigarnik Y. A. Vapor explosion: Experimental observations // *Thermal Engineering*. 2022. Vol. 69. No. 1. Pp. 66–71. https://doi.org/10.1134/S0040601521110070
9. Long G. Explosion of molten aluminum in water // *Metal. Prog.* 1957. No. 71. Pp. 107–112.
10. Witte L.C., Cox J.E., Bouvier J.E. The vapor explosions // *J. Metals*. 1970. Vol. 22. No. 2. Pp. 39–44. doi.org/10.1007/BF03355937
11. Corradini M. L., Kim B. J., Oh M. D. Vapor explosions in light water reactors: a review of theory and modeling // *Progress in Nuclear Energy*. 1988. Vol. 22. No. 1. Pp. 1–117. doi.org/10.1016/0149-1970(88)90004-2
12. Wang C., Wang Ch., Chen B., Li M., Shen Z. Fragmentation regimes during the thermal interaction between molten tin droplet and cooling water // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 166. Pp. 120782. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120782
13. Song J., Wang C., Chen B., Li M., Shen Z., Wang Ch. Phenomena and mechanism of molten copper column interaction with water // *Acta Mech.* 2020. Vol. 231. Pp. 2369–2380. doi.org/10.1007/s00707-020-02667-x
14. Simons A., Bellemans I., Crivits T., Verbeken K. The effect of vapour formation and metal droplet temperature and mass on vapour explosion behaviour // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2022. Vol. 196. Pp. 123289. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123289
15. Vasil'ev N. V., Vavilov S. N., Zeigarnik Y. A., Lidzhiiev E. A. Experimental Studies of Phenomena Occurring during Vapor Explosion Triggering // *Thermal Engineering*. 2024. Vol. 71. No. 7. Pp. 600–607. doi.org/10.1134/S0040601524700113
16. Deng, Y., Guo, Q., Xiang, Y., Fang, D., Komlev, A., Bechta, S., Ma, W. An experimental study on the effect of coolant salinity on steam explosion // *Annals of Nuclear Energy*. 2024. Vol. 201. Pp. 110420. doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110420
17. Избранные труды АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» / Отв. ред. А.А. Говердовский. Обнинск, 2021. 463 с.

18. Tan S. J., et al. Experimental investigation on the characteristics of molten lead–bismuth non-eutectic alloy fragmentation in water // *Nuclear Science and Techniques*. 2022. Vol. 33. No. 9. Pp. 115. doi.org/10.1007/s41365-022-01097-9
19. Cheng, H., Chen, X., Ye, Y., Cheng, S. Systematic experimental investigation on the characteristics of molten lead-bismuth eutectic fragmentation in water // *Nuclear Engineering and Design*. 2021. Vol. 371. Pp. 110943. doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110943
20. Kouraytem N., Li E. Q., Thoroddsen S. T. Formation of microbeads during vapor explosions of Field's metal in water // *Physical Review E*. 2016. Vol. 93. No. 6. Pp. 063108. doi.org/10.1103/PhysRevE.93.063108
21. Li M., Chen L., Liu Z., Shen Z., Wang C. Fragmentation and solidification of fuel–coolant interaction of columnar molten iron and water // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. Vol. 148. No. 20. Pp. 10897–10906. doi.org/10.1007/s10973-023-12419-3
22. Manickam L., Qiang G., Ma W., Bechta S. An experimental study on the intense heat transfer and phase change during melt and water interactions // *Experimental Heat Transfer*. 2019. Vol. 32. No. 3. Pp. 251–266. doi.org/10.1080/08916152.2018.1505786
23. Żyszkowski W. Experimental investigation of fuel-coolant interaction // *Nuclear Technology*. 1977. Vol. 33. No. 1. Pp. 40–59. doi.org/10.13182/NT77-A31762
24. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Визуализация картины течения импакта свободно падающей капли при генерации звуковых пакетов // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2022. Т. 23, вып. 5. doi.org/10.33257/PhChGD.23.5.1011
25. Чашечкин Ю. Д., Прохоров В. Е. Гидродинамика и акустика слияния капли с жидкостью в электростатическом поле // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2025. Т.26, вып. 3. doi.org/10.33257/PhChGD.26.3.1188
26. Sa R., Takahashi M., Moriyama K. Study on fragmentation behavior of liquid lead alloy droplet in water // *Progress in Nuclear Energy*. 2011. Vol. 53. No. 7. Pp. 895–901. doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.05.003
27. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. *Физика взрыва*. Москва: Издательство физико – математической литературы. 1959. 801 с.
28. Кедринский В. К. *Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели*. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. 435 с.
29. Cole R. H., Weller R. Underwater explosions // *Physics Today*. 1948. Vol. 1. No. 6. Pp. 35. doi.org/10.1063/1.3066176
30. Stebnovskii S. V., Chernobaev N. N. Energy threshold for impulsive failure of a liquid volume // *Appl. Mech. Tech. Phys.* 1986. Vol. 27. No. 1. Pp. 57–61. doi.org/10.1007/BF00911120
31. Zhao Z., Poulidakos D., Glod S. Pressure and power generation during explosive vaporization on a thin-film microheater // *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers. 1998. Vol. 15960. pp. 45–57. doi.org/10.1115/IMECE1998-1222

References

1. Berthoud G., Vapor explosions, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2000, vol. 32, no. 1, pp. 573–611. doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.573
2. Melikhov V. I., Melikhov O. I., Yakush S. E., *Hydrodynamics and Thermophysics of steam explosions*, М.: IPMech RAS, 2020. 276 p. [in Russian].
3. Melikhov V. I., Melikhov O. I., Yakush S. E., Thermal interaction of high-temperature melts with liquids, *High Temperature*, 2022, vol. 60, no. 2, pp. 252–285. doi.org/10.1134/S0018151X22020274

4. Fletcher D. F., Theofanous T. G., Heat transfer and fluid dynamic aspects of explosive melt–water interactions, *Advances in heat transfer*, 1997, vol. 29, pp. 129–213. doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70185-0
5. Shen P., Zhou W., Cassiaut-Louis N., Journeau C., Piluso P., Liao Y., Corium behavior and steam explosion risks: A review of experiments, *Annals of Nuclear Energy*, 2018, vol. 121, pp. 162–176. doi.org/10.1016/J.ANUCENE.2018.07.029
6. Ivochkin Y. P., Yudin S. M., Borodina T. I., Specific Features of the Breakup of Hot Liquid Metal Droplets Falling into Cold Water, *Technical Physics*, 2024, vol. 69, no. 10, pp. 2517–2526. doi.org/10.1134/S1063784224700828
7. Deng, Y., Guo, Q., Xiang, Y., Fang, D., Ma, W., An Experimental study on steam explosion of multiple droplets in different chemical solutions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, vol. 226, pp. 125477. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2024.125477
8. Vavilov S. N., Vasil'ev N. V., Zeigarnik Y. A., Vapor explosion: Experimental observations, *Thermal Engineering*, 2022, vol. 69, no. 1, pp. 66–71. https://doi.org/10.1134/S0040601521110070
9. Long–G. Explosion of molten aluminum in water, *Metal. Prog.*, 1957, no. 71, pp. 107–112.
10. Witte L.C., Cox J.E., Bouvier J.E., The vapor explosions, *JOM.*, 1970, vol. 22, no 2, pp. 39–44. doi.org/10.1007/BF03355937
11. Corradini M. L., Kim B. J., Oh M. D., Vapor explosions in light water reactors: a review of theory and modeling, *Progress in Nuclear Energy*, 1988, vol. 22, no. 1, pp. 1–117. doi.org/10.1016/0149-1970(88)90004-2
12. Wang C., Wang Ch., Chen B., Li M., Shen Z., Fragmentation regimes during the thermal interaction between molten tin droplet and cooling water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, vol. 166, pp. 120782. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120782
13. Song J., Wang C., Chen B., Li M., Shen Z., Wang Ch., Phenomena and mechanism of molten copper column interaction with water, *Acta Mech.*, 2020, vol. 231, pp. 2369–2380. doi.org/10.1007/s00707-020-02667-x
14. Simons A., Bellemans I., Crivits T., Verbeken K., The effect of vapour formation and metal droplet temperature and mass on vapour explosion behaviour, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, vol. 196, pp. 123289. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123289
15. Vasil'ev N. V., Vavilov S. N., Zeigarnik Y. A., Lidzhiev E. A., Experimental Studies of Phenomena Occurring during Vapor Explosion Triggering, *Thermal Engineering*, 2024, vol. 71, no. 7, pp. 600-607. doi.org/10.1134/S0040601524700113
16. Deng, Y., Guo, Q., Xiang, Y., Fang, D., Komlev, A., Bechta, S., Ma, W., An experimental study on the effect of coolant salinity on steam explosion, *Annals of Nuclear Energy*, 2024, vol. 201, pp. 110420. doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110420
17. Goverdovsky A. A., *Selected works of JSC SSC RF – FEI*. Obninsk, 2021. 463 p. [in Russian]
18. Tan S. J., Zhong Y. B., Cheng H., Cheng S. B., Experimental investigation on the characteristics of molten lead–bismuth non-eutectic alloy fragmentation in water, *Nuclear Science and Techniques*, 2022, vol. 33, no. 9, pp. 115. doi.org/10.1007/s41365-022-01097-9
19. Cheng, H., Chen, X., Ye, Y., Cheng, S. Systematic experimental investigation on the characteristics of molten lead-bismuth eutectic fragmentation in water, *Nuclear Engineering and Design*, 2021, vol. 371, pp. 110943. doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110943
20. Kouraytem N., Li E. Q., Thoroddsen S. T., Formation of microbeads during vapor explosions of Field's metal in water, *Physical Review E.*, 2016, vol. 93, no. 6, pp. 063108. doi.org/10.1103/PhysRevE.93.063108
21. Li M., Chen L., Liu Z., Shen Z., Wang C., Fragmentation and solidification of fuel–coolant interaction of columnar molten iron and water, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, vol. 148, no. 20, pp. 10897–10906. doi.org/10.1007/s10973-023-12419-3

22. Manickam L., Qiang G., Ma W., Bechta S., An experimental study on the intense heat transfer and phase change during melt and water interactions, *Experimental Heat Transfer*, 2019, vol. 32, no. 3, pp. 251–266. doi.org/10.1080/08916152.2018.1505786
23. Źyszkowski W., Experimental investigation of fuel-coolant interaction, *Nuclear Technology*, 1977, vol. 33, no. 1, pp. 40–59. doi.org/10.13182/NT77-A31762
24. Chashechkin Y. D., Prokhorov V. E., Visualization of the flow pattern of the impact of a freely falling drop during the generation of sound packets, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2022, vol. 23, no. 5. doi.org/10.33257/PhChGD.23.5.1011
25. Chashechkin Y. D., Prokhorov V. E., Hydrodynamics and Acoustics of Drop-Liquid Merging in an Electrostatic Field, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2025, vol. 26, no. 3. doi.org/10.33257/PhChGD.26.3.1188
26. Sa R., Takahashi M., Moriyama K., Study on fragmentation behavior of liquid lead alloy droplet in water, *Progress in Nuclear Energy*, 2011, vol. 53, no. 7, pp. 895–901. doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.05.003
27. Baum F. A., Stanyukovich K. P., Shekhtor B. I., *Physics of an explosion*. Moscow: FIZMATOIZ, 1959. 801p. [in Russian].
28. Kedrinskii V. K., *Hydrodynamics of Explosion: experiments and models*, Novosibirsk: Springer Science Business Media, 2005, 362 p. doi.org/10.1007/3-540-28563-6
29. Cole R. H., Weller R., Underwater explosions, *Physics Today*, 1948, vol. 1, no. 6, pp. 35. doi.org/10.1063/1.3066176
30. Stebnovskii S. V., Chernobaev N. N., Energy threshold for impulsive failure of a liquid volume, *Appl. Mech Tech Phys.*, 1986, vol. 27, no. 1, pp. 57–61. doi.org/10.1007/BF00911120
31. Zhao Z., Poulikakos D., Glod S., Pressure and power generation during explosive vaporization on a thin-film microheater, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 1998, vol. 15960, pp. 45–57. doi.org/10.1115/IMECE1998-1222

Статья поступила в редакцию 23 июня 2025 г.