

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН, СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

ПАРОВОЙ ВЗРЫВ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

© 2022 г. С. Н. Вавилов^{a, *}, Н. В. Васильев^{a, b}, Ю. А. Зейгарник^a

^aОбъединенный институт высоких температур РАН, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

^bМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, 105005 Россия

*e-mail: sergeynv@mail.ru

Поступила в редакцию 02.03.2021 г.

После доработки 17.03.2021 г.

Принята к публикации 17.03.2021 г.

В настоящей работе проведено исследование взрывной фрагментации расплавленной капли поваренной соли NaCl в дистиллированной воде, недогретой до температуры насыщения, и в воде, насыщенной углекислым газом, в отсутствие внешнего триггеринга (инициирования процесса). Взрывное деление капли на фрагменты происходило во всех проведенных экспериментах с водой температурой от 20 до 70°C, не подвергшейся насыщению газом. Этого явления не наблюдалось при контакте с водой каплей расплавленных металлов (свинца, сплавов Розе и Вуда и др.), когда взрывная фрагментация носила случайный (спонтанный) характер. Данный факт можно объяснить более низкой вязкостью расплава соли по сравнению с вязкостью жидких металлов, а также ее растворимостью в воде. Насыщение воды углекислым газом препятствовало возникновению парового взрыва даже при контакте каплей расплава NaCl с водой температурой 15–20°C. Предполагается, что наличие в воде большого количества растворенного углекислого газа приводит к его интенсивному выделению при контакте воды с поверхностью капли NaCl, экранирует ее от воды и препятствует развитию фрагментации по любой из наиболее вероятных моделей процесса (термоакустической, захвата жидкости, разрушения застывшей корки под действием термоупругих сил). Исходя из анализа высокоскоростных видеосъемок процесса сделан предварительный вывод о фактическом слиянии стадий триггеринга, тонкой фрагментации и собственно парового взрыва при контакте расплавленной капли NaCl с водой температурой 20–70°C и об отсутствии парового взрыва на каплях расплава NaCl при температуре воды выше 80°C.

Ключевые слова: паровой взрыв, недогретая вода, расплавленная соль, расплавы металлов, фрагментация, растворенный газ, триггеринг, высокоскоростная видеосъемка

DOI: 10.1134/S0040363621110072

Угроза возникновения парового взрыва сопровождает многие технологические процессы: в металлургии попадание в воду металла и шлака, взаимодействие расплава солей с жидкостью в котле-регенераторе цикла варки целлюлозы, контакт с водой сжиженного газа в ходе его транспортировки и перегрузки и т.д. [1].

Паровой взрыв может произойти в результате попадания в воду расплава кориума при тяжелой аварии атомного реактора, а также в природе при подводных извержениях вулканов.

Обычно под паровым взрывом понимается такое взаимодействие двух жидких сред, имеющих большую разницу в температурах, при котором более холодная среда резко вскипает на развитой поверхности тонко диспергированных фрагментов более горячей субстанции с последующим образованием большого объема пара, приводящего

в условиях ограниченного объема аппарата к взрывоподобному росту давления в последнем. При этом необходимо, чтобы температура плавления горячей среды была выше температуры кипения холодной субстанции. Экспериментальному изучению и феноменологическому описанию парового взрыва посвящено довольно большое количество работ, что в известной степени отражено в обзорах [1–6].

Обычно совокупный процесс парового взрыва подразделяют на четыре стадии (подпроцесса):

предварительное перемешивание (премиксинг) горячей и холодной сред с достижением характерного размера горячей среды (диаметр капли расплава) до нескольких миллиметров;

инициирование (триггеринг) развития процесса по траектории взрывного вскипания (парового взрыва);

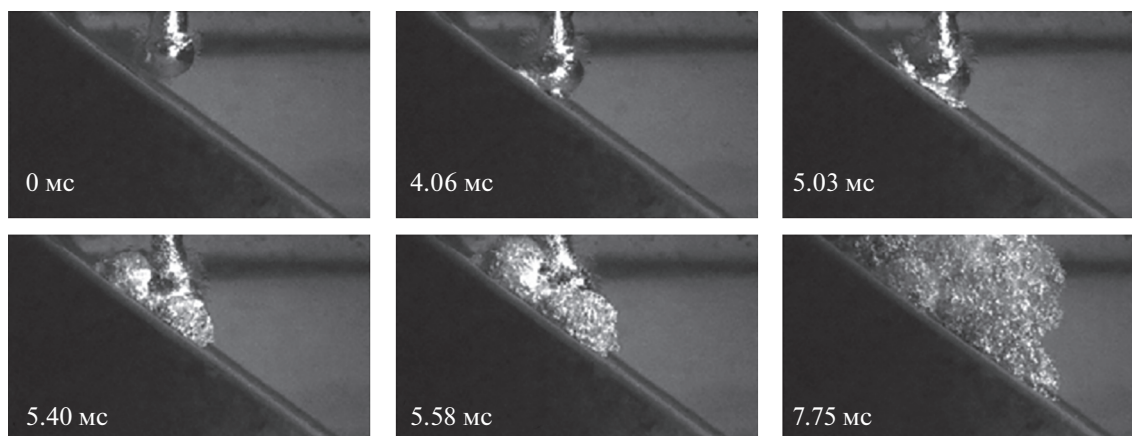


Рис. 1. Тонкая фрагментация капли олова при ударе о наклонную стенку сосуда с водой. Экспозиция – 9.5 мкс (данные ОИВТ РАН)

тонкая фрагментация горячей среды с образованием развитой поверхности теплообмена;

собственно паровой взрыв – интенсивный рост массы пара холодной субстанции.

Следует подчеркнуть, что замкнутое описание процесса в целом и особенно переходов от одной стадии к другой отсутствует, указанные подпроцессы анализируются, по сути дела, изолированно один от другого. При этом для стадий триггеринга и особенно тонкой фрагментации имеется около десятка гипотез и феноменологических описаний разной степени сложности, и даже при таком “обилии” гипотез они не охватывают всего имеющегося опытного материала.

Наличие нескольких подпроцессов и фазовых переходов в системе, претерпевающей паровой взрыв, наиболее рельефно отражают наблюдения авторов [7]. В экспериментах капли расплавленного олова температурой около 1000°C подавались в воду с температурой от 20 до 90°C. Внешний триггеринг процесса тонкой фрагментации осуществлялся путем резкого перемещения поршня, создающего импульс давления примерно 1 МПа. Скоростная видеосъемка (8 кГц) и одновременное рентгеновское просвечивание исследуемой среды дали возможность понять, что происходит в горячей и холодной субстанциях отдельно. Полученные данные позволили авторам сделать вывод о том, что внешний триггеринг (импульс давления) приводил к первичному контакту воды с поверхностью олова (первичный слой пара, возникший вокруг капли олова, фиксировался видеосъемкой). Затем после некоторого временного интервала происходила тонкая фрагментация горячей субстанции, что видно на рентгенограмме, и почти одновременно наступал собственно паровой взрыв с образованием

больших объемов водяного пара, который регистрировался с помощью скоростной видеосъемки. Характерные времена описываемых явлений – единицы миллисекунд.

Импульс давления, обеспечивающий внешний триггеринг, должен быть достаточным для того, чтобы холодная жидкость, преодолев сравнительно тонкие паровые пленки, облегающие фрагменты горячего расплава (следует отметить, что паровые пленки небольшой толщины существуют только при значительных недогревах холодной жидкости до температуры насыщения), пришла в соприкосновение с ними на достаточно большом числе таких фрагментов. В реальных условиях такой триггеринг носит случайный (спонтанный) характер. Инициировать паровой взрыв может, например, произвольный сход паровой пленки в силу “благоприятных” местных условий либо удар струи расплава о днище сосуда (рис. 1) и т.п. В экспериментах чаще всего прибегают к искусственному триггерингу – внешнему импульсу давления, создаваемому разрывом мембраны, взрывом проволоки и т.п. [2].

Дальнейшее развитие парового взрыва – тонкая фрагментация горячей субстанции – не имеет устоявшихся описаний. Существует более десятка версий механизма этого процесса (тонкой фрагментации) [2, 4, 8]. Среди них наиболее обоснованными (максимально правдоподобными) авторам настоящей статьи представляются следующие:

захват горячими крупными фрагментами (каплями) струек холодной жидкости и их последующее взрывное вскипание внутри капель;

образование твердых оболочек на капле (затвердевание поверхности капли) и их последую-

щий разрыв под действием термоупругих напряжений;

возникновение в капле многократно отражающихся волн разрежения при касании поверхности капли холодной жидкостью (термоакустический эффект) [8].

Несмотря на то что возникновение в капле многократно отражающихся волн разрежения представляет собой наиболее вероятный механизм тонкой фрагментации горячей субстанции, не исключено, что наличие принципиально различных по своей физической сущности механизмов тонкой фрагментации действительно является объективной реальностью, обусловленной конкретными условиями ее реализации. Приведенные далее результаты экспериментов ОИВТ РАН говорят в пользу такого заключения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2. Емкость из нержавеющей стали, имеющая прямоугольное поперечное сечение 530×250 мм и высоту 230 мм, заполняется до уровня 200 мм дистиллированной водой, недогретой до температуры насыщения. На боковой стенке емкости выполнено стеклянное смотровое окно для визуальных наблюдений и видеосъемки.

Одиночные капли исследуемого горячего вещества поступают в воду из устья тигля, расположенного на расстоянии 10 мм над свободной поверхностью воды. Тигель имеет форму цилиндра диаметром 18 и высотой 28 мм. В качестве материала изготовления тигля был выбран графит, поскольку он имеет несколько существенных до-

стоинств: широкий рабочий температурный диапазон, отсутствие взаимодействия с используемыми в экспериментах веществами, небольшая вероятность окисления расплавов, находящихся в устье тигля.

Диаметр внутренней полости тигля – 10 мм. В нижней ее части сделано сквозное отверстие диаметром 5 мм, которое до момента подачи жидкой капли в емкость с водой закрыто графитовым цилиндрическим стержнем со сферическим торцом. Температура в теле тигля и воды в емкости измерялась хромель-алюмелевыми термопарами и поддерживалась на заданном уровне с помощью вспомогательного электрического нагревателя. Количество расплавляемого вещества варьировалось в определенных пределах от 0.3 до 0.6 см³, чтобы получать одиночные капли расплава, следующие одна за другой, или группу капель. Нагрев тигля и плавление в нем исследуемого вещества осуществлялись с помощью высокочастотного индукционного нагревателя ВЧ-15АВ (индуктора), имеющего водяное охлаждение и тепловую изоляцию.

Видеосъемка исследуемого процесса производилась с использованием высокоскоростной видеокамеры FASTCAM SA-Z с частотой кадров до 100 кГц и минимальным временем экспозиции 2 мкс. Подсветка осуществлялась четырьмя мощными светодиодными фонарями. Циклическая запись данных в оперативную память видеокамеры начиналась до момента погружения исследуемого объекта в жидкость и отключалась вручную при достижении парового взрыва или безвзрывного схода паровой пленки. Такая видеосъемка позволяла достаточно простым способом зафиксировать исследуемые явления.

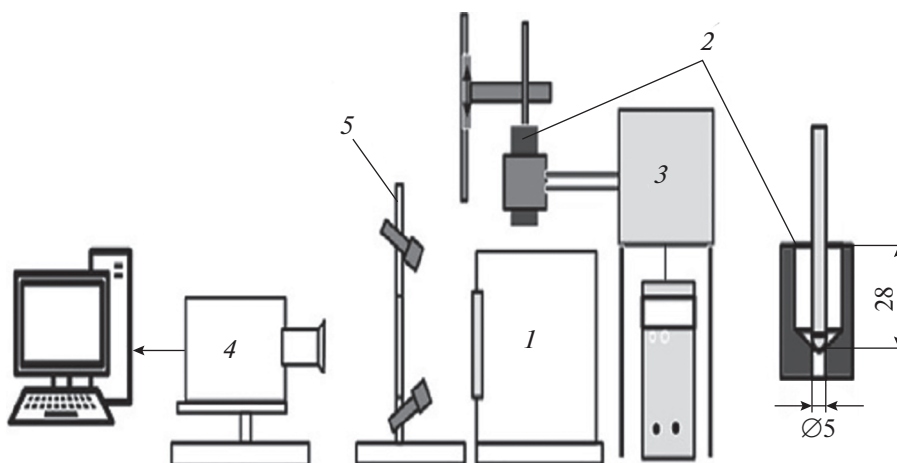


Рис. 2. Схема экспериментальной установки.

1 – емкость с водой; 2 – графитовый тигель; 3 – индуктор; 4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – подсветка

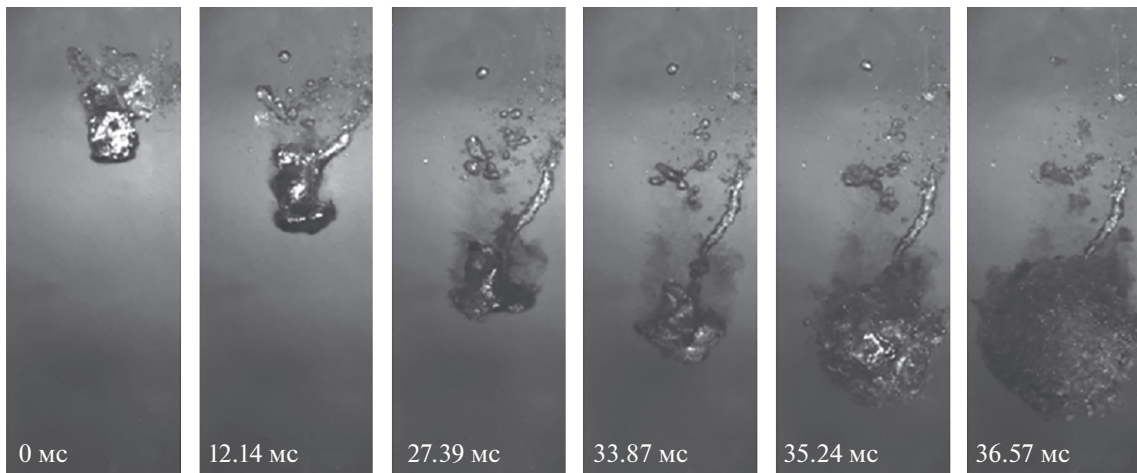


Рис. 3. Процесс взаимодействия расплавленного олова с холодной водой ($t_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$) с выдавливанием из капли струи расплава с последующим паровым взрывом. Экспозиция – 10 мкс

ПРОВЕДЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На первом этапе были проведены эксперименты по падению в воду каплю расплавов различных материалов, имеющих следующую температуру плавления $t_{\text{пл}}$:

	$t_{\text{пл}}, ^{\circ}\text{C}$
Олово	232
Свинец	327
Припой ПОС-61 (61% олова и 39% свинца)	183–191
Сплавы:	
Розе (25% олова + 25% свинца + + 50% висмута)	94
Вуда (12.5% олова + 25% свинца + + 50% висмута + 12.5% кадмия)	60–65

Температура воды в экспериментах составляла $t_{\text{в}} = 20\text{--}50^{\circ}\text{C}$, температура капель расплавов была на $100\text{--}150^{\circ}\text{C}$ выше температуры плавления.

При попадании в воду каплю исследуемых веществ на их поверхности всегда возникала паровая пленка, причем более тонкая пленка образовывалась при более высоких значениях недогрева воды до температуры насыщения. В некоторый момент паровая пленка становилась неустойчивой, в результате чего возмущения возникали и на поверхности жидкой капли. После прохождения нескольких пульсирующих волн поверхность капли существенно деформировалась, зачастую с выдавливанием из нее отдельных тонких струй рас-

плава. В итоге капля разрушалась с образованием объемной пористой структуры (рис. 3).

Спонтанно инициированные паровые взрывы носили крайне бессистемный характер. Эпизодические взрывы наблюдались лишь в нескольких опытах на сплаве Розе и с неокисленным оловом. При подаче окисленных капель расплавов вышеуказанных веществ паровые взрывы не происходили вообще.

Иные результаты были получены при подаче в воду температурой $20\text{--}70^{\circ}\text{C}$ расплава поваренной соли NaCl, нагретой до температуры $850\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ (температура плавления NaCl – 801°C).

Следует отметить, что во всех опытах с NaCl наблюдался спонтанный паровой взрыв, что принципиально отличает данную серию экспериментов от предыдущих. Эволюцию капли расплава NaCl и начальные кадры образования парового облака можно проследить на рис. 4. Создается впечатление, что стадии триггеринга, тонкой фрагментации и собственно парового взрыва как бы сливаются воедино, в отличие от обычно наблюдающейся картины стадийного развития процесса для металлов и сплавов. Более тонкие детали процесса, связанные с хорошей растворимостью мелких фрагментов соли, к сожалению, зафиксировать не удалось.

Описанным экспериментам близка работа [9], в которой изучалось взаимодействие с водой расплавленных капель смеси $80\% \text{Na}_2\text{CO}_3 + 20\% \text{NaCl}$. Результаты экспериментов [9] практически идентичны представленным в данной статье опытным данным: в [9] так же стабильно реализовался паровой взрыв. Однако в экспериментах авторов дан-

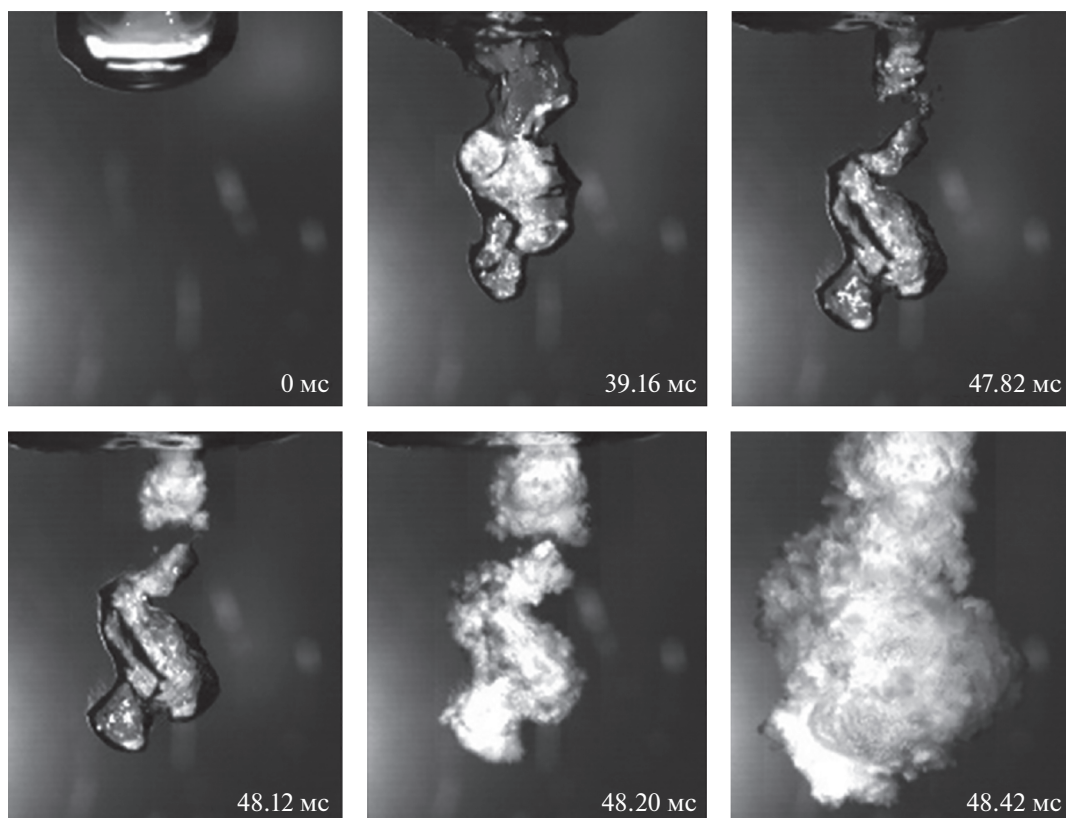


Рис. 4. Эволюция капли расплава NaCl и начальные кадры парового взрыва ($t_b = 20^\circ\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 900^\circ\text{C}$). Экспозиция – 20 мкс

ной работы видеосъемка позволяла получать более информативную картину процесса благодаря существенно большей частоте кадров (100 кГц в сравнении с 25 Гц в [9]).

В цитируемой работе [9] был установлен верхний предел температуры воды (80°C), выше которого паровой взрыв не наблюдался. В связи с этим авторами данной статьи была проведена дополнительная серия экспериментов при температуре воды в емкости $75\text{--}80^\circ\text{C}$. Опыты, выполненные в этих условиях, также показали полное отсутствие взрывов при падении капли NaCl. Эти результаты и данные экспериментов [9] согласуются с упомянутым ранее тезисом, обоснованным в [10], о том, что для достижения парового взрыва необходим достаточно большой недогрев воды до температуры насыщения.

Расплав NaCl имеет меньшую вязкость по сравнению с большинством ранее исследованных авторами веществ, но и, как общеизвестно, этот расплав хорошо смешивается с водой и растворяется в ней. Предполагается, что, распространяясь в воде от поверхности капли, горячие микроструи расплава соли, по-видимому, создают условия для

объемного вскипания воды на большом массиве пространственно распределенных центров парообразования (нуклеации), т.е. надежного спонтанного инициирования (триггеринга) “синхронизированного” во времени импульса давления.

Здесь следует повторить, что описанные выше стадии процесса парового взрыва: триггеринг, тонкая фрагментация и собственно паровой взрыв – как бы сливаются в одну. Высокоскоростная видеосъемка с частотой кадров 100 кГц позволила бы зафиксировать сдвиг по времени между стадиями, если бы он существовал.

Необходимо отметить, что на принципиальную возможность развития событий по пути перемешивания компонентов и гомогенного вскипания указывалось еще в работе [11], где исследовалось взаимодействие расплава кориума с жидким натрием при авариях с быстрыми реакторами, охлаждаемых жидкометаллическим теплоносителем.

В ходе экспериментальных исследований в ОИВТ РАН [12] было изучено влияние растворенных в воде газов на инициирование парового взрыва при попадании в воду капель расплава ме-

талла. Обычно перед проведением эксперимента по паровому взрыву вода в экспериментальной емкости деаэрировалась кипячением в течение 6–10 ч и затем охлаждалась примерно 20 мин до требуемой температуры во вспомогательном змеевиковом теплообменнике с проточной водопроводной водой. Заметного влияния наличия растворенного в воде воздуха в количестве, соответствующем атмосферному давлению, отмечено не было. В деаэрированной и недеаэрированной воде паровые взрывы носили случайный (спонтанный) характер, несколько чаще взрывы происходили в первом случае.

Также в ходе настоящего исследования были проведены специальные опыты со взаимодействием капель расплава олова с водой, насыщенной CO_2 (в этом случае количество растворенного газа было на порядок больше, чем воздуха). При насыщении воды углекислым газом паровые взрывы не были отмечены ни разу.

Дополнительно были проведены две серии экспериментов по взаимодействию капель расплава NaCl с холодной водой (15–20°C), насыщенной углекислым газом примерно до 750 мл/л (для сравнения в недегазированной воде при температуре 20°C содержится около 10 мл/л воздуха). Всего было проведено 10 опытов с заменой в каждом опыте насыщенной газом воды. Ни в одном из экспериментов не наблюдался паровой взрыв даже слабой интенсивности. Не исключено, что выделяющийся из воды растворенный газ способствует образованию достаточно устойчивой газопаровой пленки, препятствующей контакту жидкости с горячим расплавом, аналогично тому, как это наблюдается у паровых пленок при малых недогревах воды [10].

ВЫВОДЫ

1. При взаимодействии капель расплава NaCl с водой, нагретой до температуры 70°C, практически со 100%-ной вероятностью реализуется паровой взрыв, при этом стадии триггеринга, тонкой фрагментации и собственно парового взрыва сливаются в одну. Основной причиной такого явления, по-видимому, является хорошая смешиваемость двух субстанций (растворимость соли в воде).

2. При температуре воды свыше 80°C парового взрыва на каплях расплава NaCl не наблюдается.

3. Насыщение воды углекислым газом препятствует возникновению парового взрыва даже при контакте жидкости с каплями расплава NaCl при температуре воды 15–20°C.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность А.М. Агальцову за его значительный вклад в постановку и проведение экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Berthoud G.** Vapor explosions // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2000. V. 32. № 1. P. 573–611. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.573>
2. **Fletcher D.F.** Steam explosion triggering: a review of theoretical and experimental investigations // *Nucl. Eng. Des.* 1995. V. 155. P. 27–36. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(94\)00865-V](https://doi.org/10.1016/0029-5493(94)00865-V)
3. **Buchanan D.J., Dullforce T.A.** Mechanism for vapour explosions // *Nature.* 1973. V. 245. № 5419. P. 32–34. <https://doi.org/10.1038/245032a0>
4. **Ивочкин Ю.П.** Исследование механизмов термогидродинамических и МГД процессов с жидкоталлическими рабочими телами: дис. ...докт. техн. наук. М.: ОИВТ РАН, 2015.
5. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е.** Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов. М.: Изд-во ИПМех РАН, 2020.
6. **Corium** behavior and steam explosion risks: A review of experiments / P. Shen, W. Zhou, N. Cassiaut-Lois, C. Journeau, P. Piluso, Y. Liao // *Ann. Nucl. Energy.* 2018. V. 121. P. 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.07.029>
7. **Park H.S., Hansson R.C., Sehgal B.R.** Fine fragmentation of molten droplet in highly subcooled water due to vapor explosion observed by X-ray radiography // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2005. V. 29. Is. 3. P. 351–361. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.05.013>
8. **Ивочкин Ю.П., Зейгарник Ю.А., Кубриков К.Г.** Механизмы тонкой фрагментации горячего расплава, погруженного в холодную воду // *Теплоэнергетика.* 2018. № 7. С. 64–75. <https://doi.org/10.1134/S0040363618070020>
9. **Jin E., Bussmann M., Tran H.** An experimental study of smelt-water interaction in the recovery boiler dissolving tank // *Tappi J.* 2015. V. 14. № 6. P. 385–393.
10. **К вопросу** об отсутствии фрагментации горячих капель при малых недогревах охладителя / Ю.П. Ивочкин, С.Н. Вавилов, Ю.А. Зейгарник, К.Г. Кубриков // *Теплофизика и аэромеханика.* 2012. Т. 19. № 4. С. 475–481.
11. **Fauske H.** Liquid metal boiling in relation to LMBFBR safety design // *Proc. of Intern. Conf. on Safety of Fast Reactors.* Aix-En-Provence. France, 1967.
12. **Исследование** быстропотекающих процессов при кипении недогретой воды / А.М. Агальцов, С.Н. Вавилов, Ю.А. Зейгарник, С.А. Ковалев // *Вестник МЭИ.* 2013. № 4. С. 59–63.

Steam Explosion: Experimental Observations

S. N. Vavilov^{a, *}, N. V. Vasiliev^{a, b}, and Yu. A. Zeigarnik^a

^a *Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia*

^b *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005 Russia*

**e-mail: sergeynv@mail.ru*

Abstract—In this work, we studied the explosive fragmentation of a molten drop of sodium chloride NaCl in distilled water subcooled to saturation temperature and in water saturated with carbon dioxide in the absence of external triggering (process initiation). Explosive fission of a droplet into fragments occurred in all experiments performed with water with a temperature of 20 to 70°C, which was not saturated with gas. This phenomenon was not observed upon contact with water droplets of molten metals (lead, Rose and Wood alloys, etc.) when the explosive fragmentation was of a random (spontaneous) nature. This fact can be explained by the lower viscosity of the salt melt in comparison with the viscosity of liquid metals as well as by its solubility in water. The saturation of water with carbon dioxide prevented the occurrence of a steam explosion even when the NaCl melt droplets were in contact with water at a temperature of 15–20°C. It is assumed that the presence of a large amount of dissolved carbon dioxide in water leads to its intense release upon contact of water with the surface of an NaCl droplet, shields it from water, and prevents the development of fragmentation according to any of the most probable process models (thermoacoustic, liquid capture, destruction of the solidified crust under the action of thermoelastic forces). Based on the analysis of high-speed video filming of the process, a preliminary conclusion was made about the actual merging of the stages of triggering, fine fragmentation, and the actual vapor explosion upon contact of a molten NaCl drop with water at a temperature of 20–70°C and about the absence of a vapor explosion on drops of NaCl melt at a water temperature above 80°C.

Keywords: steam explosion, subcooled water, molten salt, metal melts, fragmentation, dissolved gas, triggering, high-speed video