

УДК 532.529

## ПАРОВОЙ ВЗРЫВ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СТАДИИ СПОНТАННОГО ТРИГГЕРИНГА ПРОЦЕССА

© 2022 г. Академик РАН А. В. Клименко<sup>1</sup>, С. Н. Вавилов<sup>2</sup>,  
Н. В. Васильев<sup>2,3,\*</sup>, Ю. А. Зейгарник<sup>2</sup>, Д. А. Скибин<sup>4</sup>

Поступило 26.10.2021 г.

После доработки 17.11.2021 г.

Принято к публикации 17.11.2021 г.

Несмотря на большое число выполненных экспериментальных и расчетных работ, феноменологическое описание процесса парового взрыва остается неполным. Особенно много неизвестных вопросов приходится на стадию спонтанного (случайного) триггеринга тонкой фрагментации капель горячего расплава и начала собственно парового взрыва. Представлены опытные данные по спонтанному триггерингу резкого вскипания холодной воды на капле горячего расплава соли NaCl и возбуждению этим первичным взрывом аналогичных процессов на соседней капле (каплях) расплава. Тем самым, в лабораторных условиях получена и проанализирована начальная фаза триггеринга и представлены некоторые характеристики процесса.

*Ключевые слова:* паровой взрыв, недогретая вода, расплавленная соль, тонкая фрагментация, триггеринг, высокоскоростная видеосъемка

DOI: 10.31857/S2686740022010084

### ВВЕДЕНИЕ

Под паровым взрывом обычно понимается процесс взаимодействия горячего расплавленного вещества с холодной жидкостью, когда температура вещества заметно превышает температуру предельного перегрева жидкости. Результатом такого взаимодействия является образование и резкий рост объема и давления паровой фазы. Несмотря на постоянное увеличение числа экспериментальных и расчетных работ, картина парового взрыва продолжает сохранять большое число “белых пятен” [1–4]. Это касается как феноменологического описания процесса и деталей отдельных стадий явления, так и практических рекомендаций по борьбе с ним. Особенно сложной и многоплановой является стадия триггеринга парового взрыва – запуск процесса тонкой фрагментации частиц (кластеров) горячей жидкости – продуктов стадии первичного дробления и смешения (premixing) горячей и холодной сред. Эти

исходные частицы имеют характерный размер порядка миллиметра и окружены нестационарной (колеблющейся) паровой пленкой холодной компоненты.

Сегодня общепризнано [1, 5, 6], что разрушение этой паровой пленки и вхождение горячей и холодной жидкостей в прямой контакт порождает тонкую фрагментацию горячей жидкости, рост ее удельной поверхности и собственно парового взрыва. Конкретные механизмы тонкой фрагментации, в принципе, могут быть разными [5, 6].

Экспериментально установлено, что триггеринг является случайным (стохастическим) началом процесса типа “цепной реакции”, вероятность возникновения которого, по-видимому, выше при больших объемах, прошедших стадию премиксинга горячего теплоносителя. Вероятность самопроизвольного (спонтанного) триггеринга (self-triggering) в лабораторных условиях, при изучении небольших (и даже одиночных) фрагментов существенно меньше, хотя и является отнюдь не нулевой. В лабораторных опытах в большинстве случаев прибегают к внешнему (принудительному) триггерингу – созданию импульса давления, разрушающего паровую пленку путем подрыва мембраны, резкого перемещения поршня, “электрического” взрыва проволоки и тому подобных мер.

В настоящей работе представлены результаты наблюдений спонтанно возникавшего микропарового взрыва на одиночной капле горячего рас-

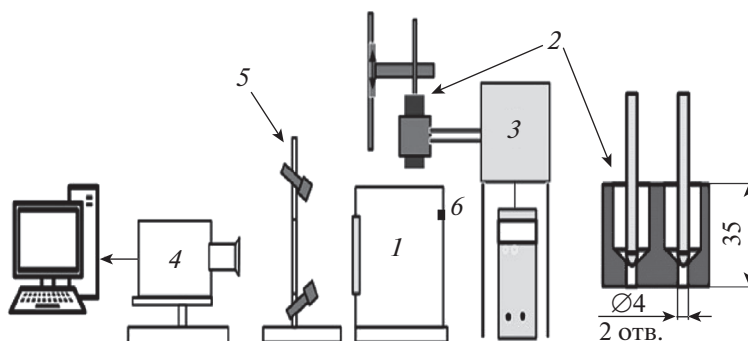
<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, Россия

<sup>2</sup> Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>4</sup> ООО “С7 КТС”, Москва, Россия

\*E-mail: [nikvikvas@mail.ru](mailto:nikvikvas@mail.ru)



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки: 1 – емкость с дистиллированной водой; 2 – двуполостный графитовый тигель; 3 – индуктор; 4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – фонари подсветки; 6 – датчик давления.

плава соли NaCl, импульса давления, сопровождающего этот микровзрыв, и возбуждения микропаровых взрывов на одной (двух) горячих каплях соли, расположенных по соседству. Тем самым, в определенной степени воспроизводилась начальная фаза реального спонтанного триггеринга парового взрыва.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 1. Емкость из нержавеющей стали, имеющая прямоугольное поперечное сечение  $530 \times 250$  мм и высоту 230 мм, заполнялась до уровня 200 мм дистиллированной водой с комнатной температурой. На боковой стенке емкости было выполнено стеклянное смотровое окно для видеосъемки процесса.

Две одиночные капли исследуемого горячего вещества поступали в воду из устьев графитового тигля, расположенного на расстоянии 10–20 мм над свободной поверхностью воды. Тигель имел форму прямоугольного параллелепипеда – высотой 35 мм, шириной 33 мм и толщиной 23 мм. Внутри тигля были высверлены две цилиндрические полости диаметрами 10 мм на глубину 30 мм, расстояние между осями которых составляло 13 мм. В нижней части обеих полостей были сделаны сквозные отверстия диаметрами 4 мм, которые до момента подачи жидкой капли в емкость с водой были закрыты графитовыми цилиндрическими стержнями с коническими торцами. Температура в теле тигля и воды в емкости измерялась хромель-алюмелевыми термопарами и поддерживалась на заданном уровне с помощью вспомогательных электрических нагревателей. Масса соли, загружаемой в каждое устье тигля, варьировалась от 1 до 2 г. Нагрев тигля и плавление в нем исследуемого вещества осуществлялись с помощью высокочастотного индукционного нагрева-

теля ВЧ-15АВ (индуктора), имеющего водяное охлаждение и тепловую изоляцию.

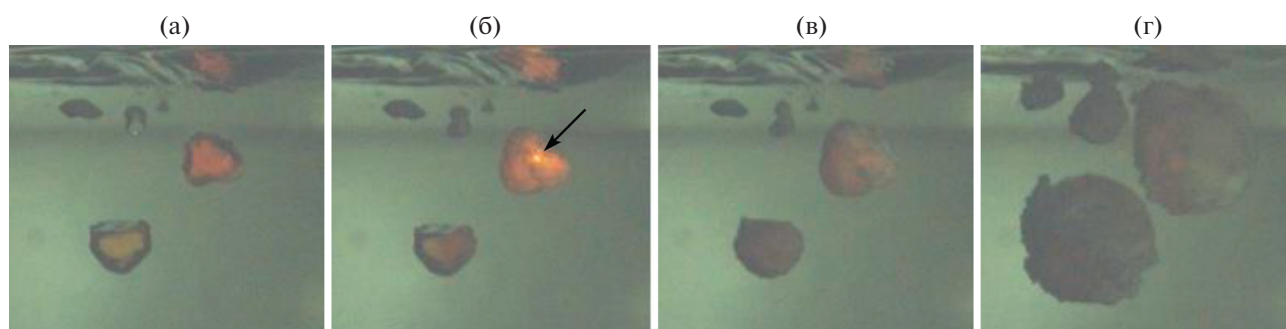
Для измерения повышения давления в процессе парового взрыва использовался высокочастотный пьезоэлектрический датчик РСВ 113В24 с резонансной частотой  $\geq 500$  кГц. Датчик размещался на стенке емкости с водой на удалении  $\sim 2$ –3 см от ожидаемого места взрыва капли расплава.

Видеосъемка исследуемого процесса производилась с использованием высокоскоростной видеокамеры Phantom VEO 410s с частотой кадров до 100 кГц и минимальным временем экспозиции 2 мкс. Подсветка осуществлялась двумя 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.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Всего было проведено около 30 опытов при температуре расплава соли 900–1100°C и температуре воды в емкости 19–24°C.

Кратко картину наблюдавшегося в опытах явления можно описать следующим образом. Две исследуемые капли расплава NaCl падают в воду одна за другой с временным интервалом в 20–50 мс. Скорость входа капель в воду рассчитывалась по высоте падения и составляла примерно 0.4–0.6 м/с. Размер капель варьировался изменением массы загружаемой в тигель навески NaCl. Типичный размер капель в экспериментах составлял 10–15 мм, что близко к характерным размерам горячей фракции, образующейся на стадии премиксинга реального парового взрыва [1]. Погрузившиеся в воду капли делились на две-три части, которые могли существовать как отдельно, так и сливаться воедино. В процессе входа капли расплава в воду она покрывается паровой “оболочкой” (см. рис. 2а). Общий объем образования “расплав соли–пар” примерно в 2 раза превышал объем содержащей-



**Рис. 2.** Спонтанный паровой взрыв капле расплава NaCl в воде ( $t_{\text{в}} = 23^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{NaCl}} = 910^{\circ}\text{C}$ ). Экспозиция – 10 мкс. Размер кадров  $44 \times 40.5$  мм. Время от кадра (а) – момента самопроизвольного триггеринга на первой капле, мкс: 60 (б); 100 (в); 380 (г).

ся в нем соли. Определить тонкую структуру этого “образования” было невозможно. Скорее всего, хорошая растворимость NaCl в воде приводит к более сложной структуре с взаимным проникновением компонент, нежели просто однородный шар горячего расплава, покрытый снаружи толстой паровой пленкой (0.7–1.0 мм). “Разрушить” столь толстую паровую пленку в ходе волнового процесса достаточно трудно [7].

“Инкубационный” период до начала спонтанного триггеринга составлял десятки, иногда несколько сотен, миллисекунд после входа капле расплава в воду. Какие-либо источники внешнего триггеринга отсутствовали. Он всегда носил случайный (спонтанный) характер. Это в числе прочего касалось и очередности взрыва капле – капля расплава, поступившая в воду позже, могла “взорваться” первой. Триггеринг начинался с локального возникновения и развития волн на поверхности капельно-парового “образования”, после этого появлялось характерное локальное светящееся пятно небольшого размера, которое может быть связано с кавитационной люминесценцией [8] (на рис. 2б это пятно указано стрелкой). Затем следовало начало микропарового взрыва, сопровождавшееся всплеском давления в несколько атмосфер, фиксировавшегося датчиком давления. Все эти процессы реализовывались в течение одного кадра видеосъемки, т.е. занимали временной интервал не более 20 мкс. Через 100–180 мкс эти же процессы повторялись на второй капле (см. рис. 2в). Временная пауза между этими микропаровыми взрывами (время передачи импульса давления) хорошо коррелирует с величиной скорости звука в воде.

Полный объем пара в  $10^5$  мм<sup>3</sup>, образовавшегося в результате взрыва капли диаметром 10–15 мм (примерно 1 г NaCl), достигался за 400 мкс. На его образование затрачивалось ~130 Дж тепла. Согласно оценкам, горячая капля NaCl при этом должна охладиться на ~150°C.

## ВЫВОДЫ

С помощью высокоскоростной видеосъемки продемонстрирован процесс возбуждения (передачи) спонтанно возникшего на одной горячей капле расплава соли NaCl резкого вскипания недогретой воды на соседние капли. Тем самым, в лабораторных условиях воспроизведен и зафиксирован спонтанный триггеринг парового взрыва.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (госзадание № 075-00460-21-00).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fletcher D.F., Theofanous T.G. Heat Transfer and Fluid Dynamic Aspects of Explosive Melt–Water Interactions // *Advances in heat transfer*. 1997. V. 29. P. 129–213. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70185-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70185-0)
2. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов. М.: Изд-во ИПМех РАН, 2020. 276 с.
3. 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>
4. Kim B., Corradini M.L. Modeling of Small-Scale Single Droplet Fuel/Coolant Interactions // *Nuclear Science and Engineering*. 1988. V. 98. № 1. P. 16–28. <https://doi.org/10.13182/NSE88-A23522>
5. Степанов Е.В. Физические аспекты явления парового взрыва. М.: Препринт ИАЭ № 54503/3, 1991. 95 с.
6. 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>
7. Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Григорьев В.С., Оксман А.А. Заметки о некоторых аспектах парового взрыва // *ТВТ*. 2008. Т. 46. № 5. С. 797–800.
8. Бирюков Д.А., Власова М.И., Герасимов Д.Н., Синкевич О.А. Гидродинамическая люминесценция и гамма-излучение // *Вестник МЭИ*. 2013. № 1. С. 69–72.

## VAPOR EXPLOSION: EXPERIMENTAL OBSERVATIONS OF SPONTANEOUS TRIGGERING PHASE

Academician of the RAS **A. V. Klimenko<sup>a</sup>**, **S. N. Vavilov<sup>b</sup>**, **N. V. Vasil'ev<sup>b,c</sup>**,  
**Yu. A. Zeigarnik<sup>b</sup>**, and **D. A. Skibin<sup>d</sup>**

<sup>a</sup> *National University of Science and Technology (MISiS), Moscow, Russia*

<sup>b</sup> *Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>c</sup> *Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

<sup>d</sup> *LLC "S7 STS", Moscow, Russia*

Despite numerous experimental works and predictions conducted a mechanistic description of the vapor (steam) explosion process remains to be incomplete. Especially many poorly resolved questions lie the phase of spontaneous triggering of the particle fine fragmentation and vapor explosion starting itself. In the paper presented the experimental data on spontaneous triggering of cold water flashing on a hot NaCl salt melt droplet and excitation by this primary explosion the similar phenomenon on the neighboring melt droplet (droplets) are described and certain characteristics of the process are given.

*Keywords:* vapor explosion, subcooled water, molten salt, fine fragmentation, triggering, high speed video recording