

Визуализация процессов, происходящих при самопроизвольном триггеринге парового взрыва

Н.В. Васильев^{1,А,В}, С.Н. Вавилов^{2,А}, Ю.А. Зейгарник^{3,А}

^А Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^В Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0001-9883-1280, nikvikvas@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-4318-9777, sergeynv@mail.ru

³ ORCID: 0000-0001-7642-2590, zeigar@oivtran.ru

Аннотация

Процесс парового взрыва представляет собой взрывной рост объема пара, сопровождающийся резким ростом давления при попадании в холодную жидкую среду горячего расплава с температурой выше ее температуры предельного перегрева. Данное явление несёт угрозу больших разрушений и человеческих жертв при определенных типах аварий в атомной, металлургической, целлюлозно-бумажной отраслях промышленности. Однако до сих пор остается много недостаточно изученных аспектов этого явления, одним из которых является инициирование (триггеринг) процесса.

Имеется ряд логически достаточно последовательных описаний процессов, происходящих на данной стадии парового взрыва. Однако практически все они опираются на эксперименты, проведенные при внешнем (принудительном) триггеринге. В статье описаны данные, полученные при самопроизвольном триггеринге, т.е. в условиях, существенно более близких к реальности.

В данной работе с помощью высокоскоростной видеосъемки (с частотой кадров до 180 кГц и временем экспозиции до 2 мкс) представлена впервые полученная визуализация процессов, происходящих при самопроизвольном триггеринге парового взрыва на расплавленных каплях соли NaCl в дистиллированной воде, недогретой до температуры насыщения. Показано, что при взаимодействии нескольких капель расплава NaCl с водой микропаровой взрыв, произошедший на одной капле, с интервалом в несколько десятков микросекунд вызывает взрывное парообразование и на соседних каплях. Тем самым, логические описания процессов получили инструментальное подтверждение.

Ключевые слова: паровой взрыв, недогретая вода, расплавленная соль, самопроизвольный триггеринг, высокоскоростная видеосъемка.

1. Введение

Процесс парового взрыва реализуется при контакте двух жидкостей с разными температурами (когда горячая нагрета выше температуры предельного перегрева холодной), в результате чего происходит взрывное вскипание холодной жидкости с образованием больших объемов пара и ростом давления в пространстве ограниченных размеров, в котором развиваются эти события. Это явление может наблюдаться в атомной энергетике при попадании кориума (расплава активной зоны) в воду при тяжелой аварии на АЭС, в металлургической и целлюлозно-бумажной отраслях промышленности, происходит при подводных извержениях вулканов. Исследованию процесса парового взрыва посвящено достаточно большое количество как экспериментальных, так и расчетно-теоретических работ, отраженных в ряде

обстоятельных обзоров [1–7]. Однако целостной теории данного явления на сегодняшний день не создано, что объясняется сложностью и многообразием форм и ситуаций, при которых оно может реализовываться.

Процесс парового взрыва принято разделять на четыре стадии: начальное грубое перемешивание струи расплава (премиксинг), инициирование взрыва (триггеринг), тонкая фрагментация капель расплава (резкое увеличение площади горячей поверхности со взрывной генерацией большой массы пара, зачастую сопровождаемая распространением мощной ударной волны) и расширение продуктов взрыва в окружающее пространство. На сегодняшний день наименее изученной стадией процесса является его инициирование. В частности в литературе отсутствуют экспериментальные данные о передаче импульса парового взрыва между отдельными каплями расплава.

Для экспериментального исследования процессов, происходящих при триггеринге парового взрыва, наиболее целесообразно проводить их с одиночными каплями или с группой капель (массой несколько грамм) горячего вещества. В качестве основного инструмента в таких исследованиях ввиду быстротечности процесса (десятки-сотни мкс) применяется визуализация с помощью высокоскоростной видеосъемки. В нашей предыдущей работе была показана практически 100% реализация парового взрыва на одиночной капле расплава соли NaCl (при температуре $t_{\text{NaCl}} = 850\text{--}1100^\circ\text{C}$ в воде с температурой $t_{\text{в}} = 20\text{--}70^\circ\text{C}$) при самопроизвольном триггеринге процесса [8]. В настоящей работе произведена визуализация с помощью высокоскоростной видеосъемки (с частотой кадров до 180 кГц и временем экспозиции до 2 мкс) «цепной реакции» передачи импульса парового взрыва между отдельными каплями расплава NaCl от места начального самопроизвольного триггеринга. Данный метод является более приближенным к реальным условиям, чем зачастую используемый во многих исследованиях внешний искусственный триггеринг (резкое перемещение поршня, разрыв диафрагмы, разделяющей рабочий объем и емкость с высоким давлением, «электрический» взрыв проволоочки).

2. Экспериментальная установка и методика исследования

Исследования проводились на экспериментальной установке, схема которой представлена на рис. 1. Емкость из нержавеющей стали, имеющая прямоугольное поперечное сечение 530×250 мм и высоту 230 мм, заполнялась до уровня примерно 200 мм дистиллированной водой. На боковой стенке емкости было выполнено стеклянное окно для визуализации процесса с помощью высокоскоростной видеосъемки.

Расплавленные капли соли NaCl поступали в воду из устьев графитового тигля (поз. 2 на рис. 1), расположенного на расстоянии 60–80 мм над свободной поверхностью воды. Использование тигля из графита позволяло существенно снизить вероятность окисления расплавляемой среды во время нагрева. Тигель имел форму прямоугольного параллелепипеда – высотой 35 мм, шириной 33 мм и толщиной 23 мм. Внутри тигля были высверлены две цилиндрические полости диаметром 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 расплавленных капель в емкость с водой закрывались графитовыми цилиндрическим стержнями с коническими торцами (поз. 3 на рис. 1). Подача капель осуществлялась при подъеме графитовых стержней с помощью специального автоматизированного механизма в виде линейного подвижного устройства (поз. 4 на рис. 1), работающего от источника с напряжением 12 В постоянного тока.

Нагревание тигля до температуры $850\text{--}1150^\circ\text{C}$ для плавления в нем соли (температура плавления NaCl – 801°C) осуществлялось с помощью высокочастотного

индукционного нагревателя ВЧ-15АВ (индуктора) (поз. 5 на рис. 1). Температура в теле тигля и воды в емкости измерялась хромель-алюмелевыми термопарами. Масса соли, загружаемой в каждое устье тигля, варьировалась от 1 до 2 грамм.

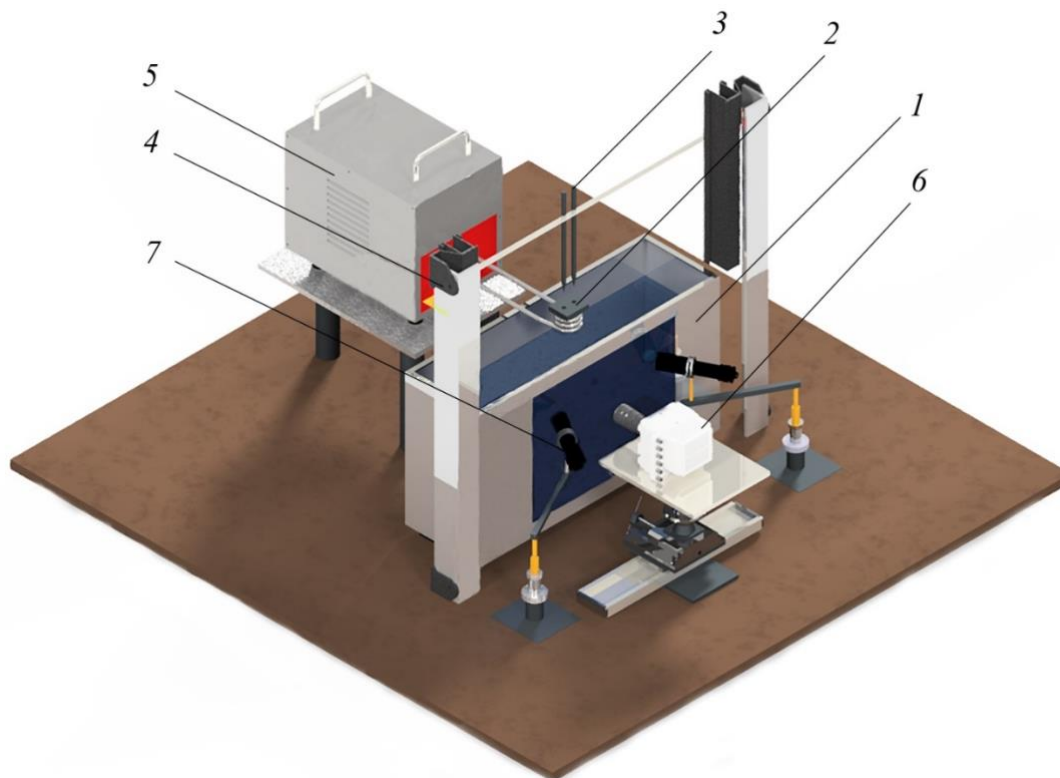


Рис. 1. Схема-модель экспериментальной установки: 1 – емкость с дистиллированной водой; 2 – графитовый тигель-генератор капель расплава; 3 – стержни из графита; 4 – вертикальное линейное перемещающее устройство; 5 – ВЧ-индуктор; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – фонари подсветки.

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

Визуализация исследуемого процесса производилась с использованием высокоскоростных видеокамер – монохромной Phantom v2012 или цветной Phantom VEO 410s (поз. 6 на рис. 1) с частотой кадров до 180 кГц и минимальным временем экспозиции 2 мкс. Камера устанавливалась на специальном подвижном по двум осям (по горизонтали и вертикали) лабораторном столике. При съемке использовался объектив Sigma DC 18–125 mm 1:3.8–5.6 HSM. Подсветка осуществлялась двумя мощными светодиодными фонарями Fenix TK20R с максимальной яркостью 1000 люмен каждый (поз. 7 на рис. 1). В отдельных экспериментах для улучшения освещения использовались дополнительные фонари, погруженные в емкость с водой.

3. Результаты исследования

На рис. 2 представлены типичные кадры визуализации передачи импульса парового взрыва между расплавленными каплями NaCl. Видео было снято на цветную видеокамеру Phantom VEO 410s с частотой кадров 50 кГц (20 мкс между последовательными кадрами) и временем экспозиции – 10 мкс. После входа в воду капли могли делиться на несколько частей, которые существовали независимо, либо повторно сливались воедино (на рис. 2а можно видеть четыре отдельные капли размерами от 3 до 8 мм). Промежуток времени от падения капель в воду до начала

самопроизвольного триггеринга составлял от нескольких десятков до сотен миллисекунд. Триггеринг начинался с локального возникновения возмущений паровой пленки вокруг одной из расплавленных капель (место триггеринга обозначено белой стрелкой на рис. 2а). Через некоторый небольшой промежуток времени, составлявший несколько десятков мкс, возмущения распространялись на всю поверхность капли (рис. 2б–в). Картина в большой степени напоминала наблюдавшуюся в [9] на твердых нагретых сферах. Затем появлялось характерное короткоживущее (в течение одного кадра видеосъемки, т.е. в данном случае не более 20 мкс) локальное светящееся пятно характерным размером примерно 1 мм, которое может быть связано с кавитационной люминисценцией (обозначено черной стрелкой на рис. 2г), и следовало начало парового взрыва, сопровождающееся интенсивным ростом объема пара. Светящееся пятно наблюдалось нами в достаточно большом количестве опытов на каплях NaCl. Упоминания о нем имеются еще в обзоре [3]. Затем процесс взрывного парообразования распространялся на соседние капли (рис. 2д). Временная пауза между микровзрывами на соседних каплях (время передачи импульса давления) приемлемо коррелирует с величиной скорости звука в воде.

По рис. 2 стоит отметить важный момент, состоящий в том, что взрывное парообразование на первой капле происходило через несколько кадров после начала локальных возмущений паровой пленки (рис. 2а–г), в то время как этот процесс на соседних каплях начинался в пределах одного кадра (промежуток времени до 20 мкс) после взрыва на первой капле (рис. 2д). По всей видимости, ускорение процесса на последующих каплях было следствием волны давления, распространяющейся в жидкости после взрыва на первой капле и приводящей к контакту воды с горячим расплавом.

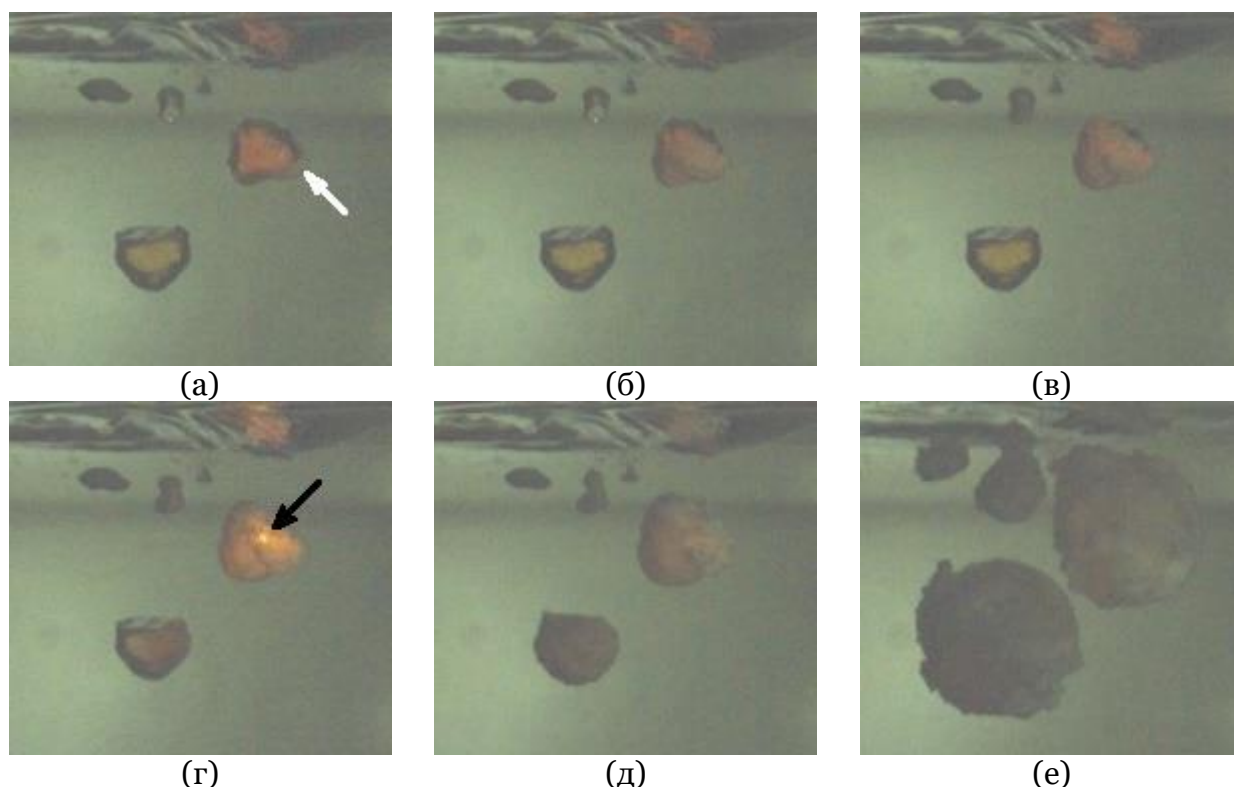


Рис. 2. Распространение парового взрыва между каплями NaCl ($t_{\text{в}} = 23^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 910^{\circ}\text{C}$ в тигле). Время экспозиции – 10 мкс. Размер кадров 44 x 40,5 мм. Время от кадра (а) – начала триггеринга на первой капле: (б) – 20 мкс; (в) – 40 мкс; (г) – 60 мкс; (д) – 100 мкс; (е) – 380 мкс. Белой стрелкой отмечено место начала триггеринга (локальных возмущений паровой пленки), черной стрелкой – кратковременная световая вспышка.

На рис. 3 представлены кадры из видео распространения парового взрыва, снятого на видеокамеру Phantom v2012 с частотой кадров 30 кГц (33 мкс между последовательными кадрами) и временем экспозиции – 10 мкс. Как видно на кадре рис. 3а, после падения в воду сформировались пять отдельных капель NaCl, отделенных паровым слоем от жидкости каждая. Промежуток времени между падением первой и последней капель (нумерация капель приведена на рис. 3а) в воду составлял примерно 100 мс. На рис. 3а изображен момент самопроизвольного парового взрыва на первой капле соли. За 6 кадров до этого на первой капле появились локальные возмущения паровой пленки, то есть промежуток времени от начала триггеринга до взрыва на первой капле занял примерно 200 мкс. На кадре рис. 3б показан момент передачи взрыва на близлежащую вторую каплю и начала возмущений паровой пленки на третьей капле. Следующие два кадра иллюстрируют моменты передачи взрыва на третью (рис. 3в) и четвертую (рис. 3г) капли и начала возмущений паровой пленки на четвертой (рис. 3в) и пятой (рис. 3г) каплях соответственно. На кадре рис. 3д процесс взрыва распространяется на самую дальнюю пятую каплю. Промежуток времени между кадрами рис. 3а и рис. 3д составляет всего примерно 165 мкс.

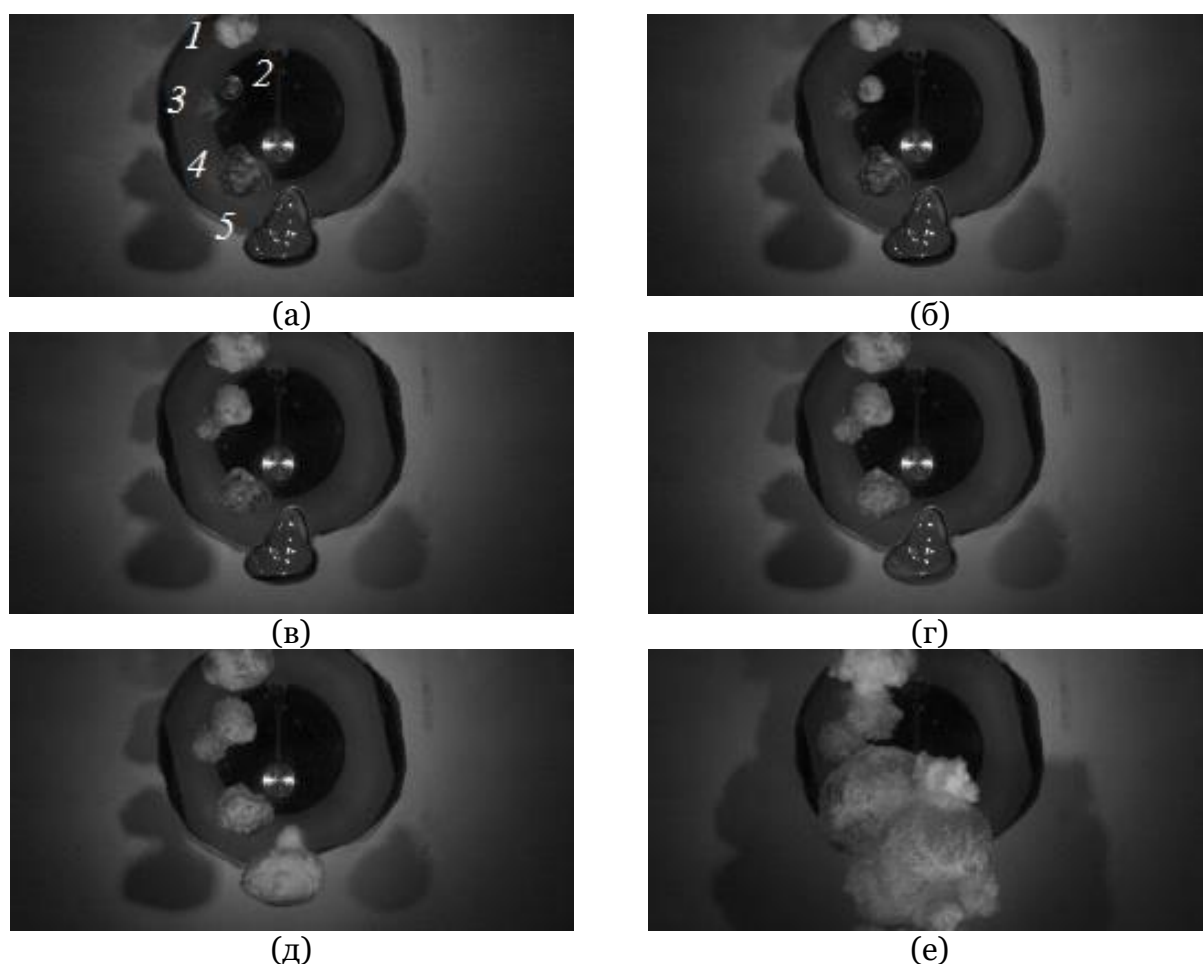


Рис. 3. Распространение парового взрыва между каплями NaCl ($t_b = 23^\circ\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 1150^\circ\text{C}$ в тигле). Время экспозиции – 10 мкс. Размер кадров 87 x 43,5 мм. Время от кадра (а) – парового взрыва на первой капле: (б) – 33 мкс; (в) – 99 мкс; (г) – 132 мкс; (д) – 165 мкс; (е) – 495 мкс. На заднем фоне виден датчик давления с элементом крепления на стенке. Нумерация капель приведена на кадре (а).

На рис. 3 так же, как и на рис. 2, наблюдается «мгновенная» за 1–2 кадра передача парового взрыва от первой капли к соседним, в то время как взрывное парообразование на первой капле происходит после распространения локальных

возмущений паровой пленки на всю поверхность капли за 6 кадров (примерно 200 мкс). При использовании внешнего искусственного триггеринга процесс будет развиваться аналогично происходящим на каплях 2–5 на рис. 3. То есть использование методики внешнего триггеринга процесса отдаляет эксперимент от реальных условий, так как не позволяет в нем отследить стадию локальных возмущений паровой пленки, происходящих при самопроизвольном триггеринге на первой капле

4. Заключение

С помощью высокоскоростной видеосъемки произведена визуализация процессов, происходящих при самопроизвольном триггеринге парового взрыва на расплавленных каплях соли NaCl в дистиллированной воде. Инструментально зарегистрирована «цепная реакция» передачи импульса парового взрыва между отдельными каплями расплава NaCl от места начального самопроизвольного триггеринга.

Инструментальное (визуальное) подтверждение логических построений, полученное в условиях самопроизвольного триггеринга, существенно более близких к реальности, чем опыты с внешним (искусственным) триггерингом, очень важно для построения адекватных реальности феноменологических моделей явления.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Госзадание № 075-01129-23-00).

Список литературы

1. Reid R.C. Rapid phase transitions from liquid to water // *Advances in Chemical Engineering*. 1983. V. 12. P. 105–208.
2. Степанов Е.В. Физические аспекты явления парового взрыва // *Препринт ИАЭ*. 1991. № 54503/3.
3. 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.
4. Berthoud G. Vapor explosions // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2000. V. 32. № 1. P. 573–611.
5. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Термическое взаимодействие высокотемпературных расплавов с жидкостями // *Теплофизика высоких температур*. 2022. Т. 60. № 2. С. 280–318.
6. 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. V. 121. P. 162–176.
7. Simons A., Bellemans I., Crivits T., Verbeken K. Heat Transfer Considerations on the Spontaneous Triggering of Vapor Explosions – A Review // *Metals*. 2021. V. 11. № 55.
8. Вавилов С.Н., Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А. Паровой взрыв: экспериментальные наблюдения // *Теплоэнергетика*. 2022. № 1. С. 78–84.
9. Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Глазков В.В., Синкевич О.А. Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду // *Теплофизика высоких температур*. 2005. Т. 43. № 1. С. 100–114.

Visualization of the Processes Occurring during Spontaneous Triggering of a Vapor Explosion

N.V. Vasil'ev^{1,A,B}, S.N. Vavilov^{2,A}, Yu.A. Zeigarnik^{3,A}

^A Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^B Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ ORCID: 0000-0001-9883-1280, nikvikvas@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-4318-9777, sergeynv@mail.ru

³ ORCID: 0000-0001-7642-2590, zeigar@oivtran.ru

Abstract

The vapor explosion process is an explosive increase in the volume of vapor, accompanied by a sharp rise in pressure when a hot melt enters a cold liquid medium with a temperature above its limiting superheat temperature. This phenomenon incurs the threat of great destruction and human casualties in certain types of accidents in the nuclear, metallurgical, pulp and paper industries. Nevertheless, there are still many insufficiently studied aspects of this phenomenon, one of which is the initiation (triggering) of the process.

There are a number of logically fairly consistent descriptions of the processes occurring at a given stage of a vapor explosion. However, almost all of them are based on experiments carried out with external (forced) triggering. The article describes the data obtained during spontaneous triggering, i.e. under conditions much closer to reality.

In this paper, using high-speed video recording (with a frame rate of up to 180 kHz and an exposure time of up to 2 μ s), the first visualization of the processes occurring during spontaneous triggering of a vapor explosion on molten NaCl salt drops in distilled water subcooled to saturation temperature is presented. It is shown that when several drops of the NaCl melt interact with water, the micro vapor explosion that occurred on one drop, with an interval of several tens of microseconds, causes explosive vaporization on neighboring drops as well. Thus, the logical descriptions of the processes received instrumental confirmation.

Keywords: vapor explosion, subcooled water, molten salt, spontaneous triggering, high-speed video filming.

References

1. Reid R.C. Rapid phase transitions from liquid to water // *Advances in Chemical Engineering*. 1983. V. 12. P. 105–208.
2. Stepanov E.V. Physical aspects of the vapor explosion phenomenon // IAE Preprint. 1991. № 54503/3. [in Russian]
3. 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.
4. Berthoud G. Vapor explosions // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2000. V. 32. № 1. P. 573–611.
5. Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Thermal interaction of high-temperature melts with liquids. *High Temperature*. 2022. V. 60.
6. 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. V. 121. P. 162–176.
7. Simons A., Bellemans I., Crivits T., Verbeken K. Heat Transfer Considerations on the Spontaneous Triggering of Vapor Explosions – A Review // *Metals*. 2021. V. 11. № 55.
8. Vavilov S.N., Vasil'ev N.V., Zeigarnik Yu.A. Vapor Explosion: Experimental Observations // *Thermal Engineering*. 2022. V. 69. № 1. P. 66–71.

9. Grigor'ev V.S., Zhilin V.G., Zeigarnik Yu.A., Ivochkin Yu.P., Glazkov V.V., Sinkevich O.A. The behavior of a vapor film on a highly superheated surface immersed in subcooled water. High Temperature. 2005. V. 43. № 1. P. 103–118.