



## Исследование самопроизвольного триггеринга и распространения парового взрыва на расплавленных каплях соли<sup>1</sup>

Васильев Н.В.<sup>\*\*\*</sup>, Вавилов С.Н.<sup>\*</sup>, Лиджиев Е.А.<sup>\*\*\*</sup>, Зейгарник Ю.А.<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

<sup>\*\*</sup>Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

### Введение

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. Это явление может наблюдаться во многих важных отраслях промышленности (атомной энергетике, металлургической, целлюлозно-бумажной). Исследованию процесса парового взрыва посвящено большое количество экспериментальных и расчетно-теоретических работ, отраженных в ряде обстоятельных обзоров [1–4]. Однако целостной теории данного явления на сегодняшний день не создано, что объясняется сложностью и многообразием форм и ситуаций, при которых оно может реализовываться.

На сегодняшний день наименее изученной стадией процесса является его инициирование (триггеринг). В частности, в литературе отсутствуют экспериментальные данные о передаче импульса парового взрыва между отдельными каплями расплава. С целью исследования процессов, происходящих при триггеринге парового взрыва, наиболее целесообразно проводить эксперименты 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 работе была показана практически 100 % реализация парового взрыва на одиночной капле расплава соли NaCl (при температуре  $t_{\text{NaCl}} = 850 - 1100^\circ\text{C}$  в воде с температурой  $t_{\text{в}} = 20 - 70^\circ\text{C}$ ) при самопроизвольном (без внешнего искусственного воздействия на систему) триггеринге процесса [5]. В данной работе представлены результаты визуализации с помощью высокоскоростной видеосъемки «цепной реакции» передачи импульса парового взрыва между отдельными каплями расплава NaCl от места начального самопроизвольного триггеринга. Данный метод

<sup>1</sup>Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01062.

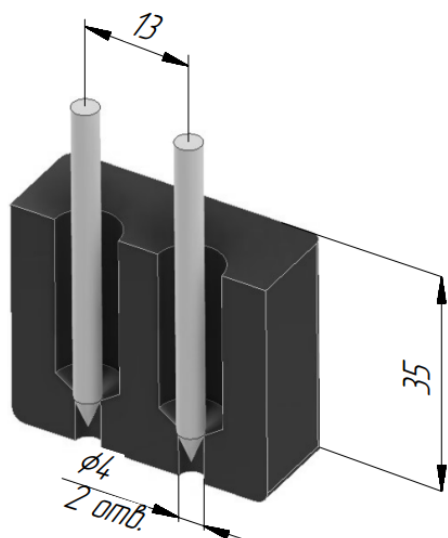


Рис. 1. Схема двуполостного графитового тигля-генератора расплавленных капель соли

является более приближенным к реальным условиям, чем зачастую используемый во многих исследованиях внешний искусственный триггеринг (резкое перемещение поршня, разрыв диафрагм, разделяющей рабочий объем и емкость с высоким давлением, «электрический» взрыв проволоочки и др.).

### Установка и методика проведения экспериментального исследования

Экспериментальная установка включала в себя емкость с дистиллированной водой с прямоугольного поперечного сечения  $230 \times 250$  мм и высотой 530 мм.

Расплавление капель соли NaCl осуществлялось с помощью высокочастотного индукционного нагревателя ВЧ-15АВ (индуктора) в графитовом тигле (Рис. 1), расположенном на высоте 60–80 мм от свободной поверхности жидкости. 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 цилиндрическими стержнями с коническими торцами. Подача капель осуществлялась при подъеме графитовых стерж-

ней с помощью специального автоматизированного механизма.

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.

На боковой стенке емкости имелось стеклянное смотровое окно для осуществления высокоскоростной видеосъемки процесса, которая производилась с помощью высокоскоростных камер — монохромной Phantom v2012 или цветной Phantom VEO 410s с максимальной частотой кадров до 180 кГц и минимальным временем экспозиции до 2 мкс. Подсветка осуществлялась двумя мощными светодиодными фонарями.

### Результаты исследования

На Рис. 2 представлены типичные кадры из высокоскоростной видеосъемки процесса передачи импульса парового взрыва после самопроизвольного триггеринга между расплавленными каплями соли NaCl. 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 (две пронумерованные крупные размером около 8 мм, и две мелкие). 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, эти возмущения распространялись на всю поверхность капли (Рис. 2б–в). Затем появлялось характерное кратковременное (в течение одного кадра видеосъемки, т.е. в данном случае не более 20 мкс) локальное светящееся пятно характерным размером примерно 1 мм (Рис. 2г), которое может быть связано с кавитационной люминисценцией. После этого 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 [2]. 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.

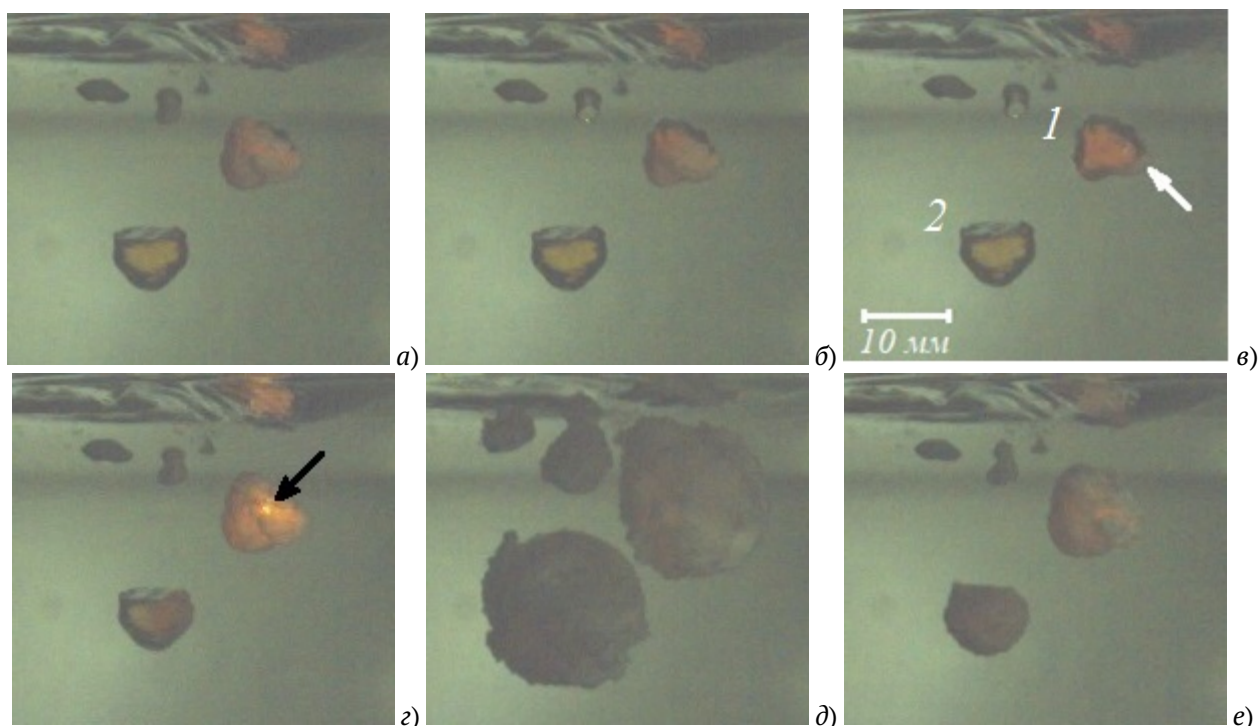


Рис. 2. Распространение парового взрыва между каплями соли ( $t_{\text{в}} = 23^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{NaCl}} = 910^{\circ}\text{C}$  в тигле). Время экспозиции – 10 мкс. Размер кадров  $44 \times 40.5$  мм. Время от кадра *a)* – начала самопроизвольного триггеринга на первой капле; *б)* – 20 мкс; *в)* – 40 мкс; *г)* – 60 мкс; *д)* – 100 мкс; *е)* – 380 мкс. Белой стрелкой отмечено место начала триггеринга, черной стрелкой – кратковременная световая вспышка. Нумерация крупных капель приведена на кадре *a)*

## Список литературы

- [1] Reid R.C. Rapid phase transitions from liquid to water // *Advances in Chemical Engineering*. 1983. V. 12. P. 105–208.
- [2] 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.
- [3] Berthoud G. Vapor explosions // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2000. V. 32(1). P. 573–611.
- [4] 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.
- [5] Вавилов С.Н., Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А. Паровой взрыв: экспериментальные наблюдения // *Теплоэнергетика*. 2022. № 1. С. 78–84.
- [6] Вавилов С.Н., Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А., Клименко А.В., Скибин Д.А. Спонтанный триггеринг парового взрыва: результаты экспериментальных исследований // *Теплоэнергетика*. 2022. № 7. С. 15–22.