

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

СПОНТАННЫЙ ТРИГГЕРИНГ ПАРОВОГО ВЗРЫВА:
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ¹

© 2022 г. С. Н. Вавилов^а, Н. В. Васильев^{а, б, *}, Ю. А. Зейгарник^а, А. В. Клименко^с, Д. А. Скибин^д

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

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

^сНациональный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049 Россия

^дООО “С 7 Космические транспортные системы”, ул. Петровка, д. 7, Москва, 107031 Россия

*e-mail: nikvikvas@mail.ru

Поступила в редакцию 17.12.2021 г.

После доработки 16.01.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2022 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований спонтанного (самопроизвольного) триггеринга парового взрыва, полученные в модельных условиях опытов с нагретыми твердыми полусферическими образцами, а также в лабораторных условиях взаимодействия капель расплава поваренной соли NaCl с дистиллированной водой с температурой от 15 до 70°C. Показано, что спонтанному триггерингу парового взрыва предшествует развитие сильных, неупорядоченных, трехмерных возмущений (колебаний) паровой пленки, образующейся на горячих фрагментах на этапе предварительного перемешивания (premixing). Такие колебания сопровождаются разрушением пленки и созданием возможности локального кратковременного контакта двух жидкостей и интенсивного, взрывного образования паровой фазы летучей фракции. Эксперименты также показали, что в лабораторных условиях спонтанный паровой взрыв на каплях расплавов множества металлов и сплавов (свинец, олово, припой ПОС-61, сплавы Вуда и Розе) наблюдается довольно редко и для его реализации, как правило, приходится прибегать к внешнему триггерингу – наложению импульса давления. При взаимодействии расплава соли NaCl с водой, имеющей температуру 15–70°C, спонтанный триггеринг парового взрыва реализовывался практически со 100%-ной вероятностью. Показано, что при взаимодействии нескольких капель расплава NaCl с водой спонтанный триггеринг парового взрыва, произошедший на одной капле, с интервалом в несколько десятков микросекунд вызывает взрывное парообразование и на других каплях. Спонтанный триггеринг сопровождается характерным резким ростом давления в рабочей среде и люминесцентными вспышками на поверхности капли расплава. Выдвинут тезис об отсутствии для всех ситуаций и комбинаций режимных условий единого механизма тонкой фрагментации горячей фракции.

Ключевые слова: паровой взрыв, недогретая вода, расплавленная соль, тонкая фрагментация, паровая пленка, спонтанный триггеринг, высокоскоростная видеосъемка

DOI: 10.1134/S0040363622070074

Паровой взрыв реализуется при прямом контакте двух жидкостей с разными температурами (когда горячая нагрета существенно выше температуры насыщения 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 наблюдается в атомной энергетике при попадании кориума (расплава активной зоны) в воду при тяжелой аварии на АЭС, в металлургической, алюминиевой, целлюлозной отраслях промышленности. Оно также возможно при контакте сжиженного природного газа или иных криогенных жидкостей с водой в ходе логистических операций, сопровождается извержением подводных вулканов и наблюдается во многих других случаях.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (госзадание № 07501056-22-00).
Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.1134/S0040363622070074 для авторизованных пользователей.

Изучению парового взрыва посвящено большое количество экспериментальных и расчетно-теоретических работ, причем опыты проводились как на крупномасштабных стендах, так и на лабораторных установках. Имеется несколько обстоятельных обзорных работ, например [1–6]. Процессы теплообмена, связанные с разрушением паровой пленки, переходом к режиму пузырькового кипения и вызванным этими процессами спонтанным (самопроизвольным) триггерингом парового взрыва рассмотрены в [7], правда, главным образом в виде расчетных оценок. В [8] при расчетно-теоретическом моделировании взрывного вскипания в тонкой пленке воды на перегретой поверхности обнаружено несколько интересных гидродинамических явлений, которые могут с довольно высокой вероятностью реализовываться в паровых пленках, окружающих фрагменты горячей жидкости при паровом взрыве.

Еще в 1967 г. Х. Фауске были сформулированы следующие “необходимые” условия для реализации парового взрыва [9]:

- в результате процессов, происходящих на стадии предварительного перемешивания горячей и холодной сред (premixing), фрагменты горячей и холодной жидкостей должны оказаться разделенными паровой пленкой, создаваемой парами холодной жидкости;
- горячая и холодная жидкости, преодолев эту разделительную паровую пленку, должны быть тем или иным путем приведены в прямой тепловой и материальный контакт, т.е. должен существовать механизм запуска (triggering) тонкой фрагментации горячей жидкости и интенсивного парообразования холодной жидкости на созданной развитой межфазной поверхности;
- температура поверхности горячей жидкости должна быть выше температуры гомогенного зародышеобразования (нуклеации) холодной жидкости, т.е. должны возникать условия для спонтанного импульсного вскипания с большим числом центров парообразования;
- должны существовать инерциальные ограничения среды для создания ударной волны и “отталкивания” жидкости.

По всем этим подпроцессам совокупного явления парового взрыва накоплен определенный экспериментальный материал и имеются “частные” механистические описания. Самопроизвольный триггеринг тонкой фрагментации горячей жидкости, необходимый для обеспечения большой поверхности теплоотдачи (фазового перехода), во всех этих экспериментах реализовывался далеко не при всяких режимных параметрах, пространственных и гидродинамических условиях. И режимные

параметры, и условия самопроизвольного триггеринга в полной мере до сих пор не выяснены.

Температурный диапазон для воды, в пределах которого наблюдался триггеринг на олове [так называемая температурная зона взаимодействия – TIZ (от англ. temperature interaction zone)], приводится, в частности, в [7]. Сам механизм дробления “крупных” фрагментов горячей жидкости (их характерный размер – примерно 10 мм) на мелкие капли (так называемая тонкая фрагментация) не имеет сколь-либо законченного строгого описания. Число правдоподобных моделей тонкой фрагментации исчисляется десятками [1, 10, 11], и, по всей видимости, этот факт обусловлен объективно, т.е. механизм процесса тонкой фрагментации может быть различным в разных условиях. В итоге, несмотря на несколько полезных практических рекомендаций и оценок [1, 2, 12], очень многие детали процесса парового взрыва остаются неясными. Ситуация как бы перешла во вторую фазу – период накопления дополнительных, более тонких экспериментальных данных и более точных расчетных оценок. В течение довольно длительного периода времени в ОИВТ РАН проводились скоординированные экспериментальные исследования явлений, предваряющих или сопровождающих триггеринг тонкой фрагментации горячего теплоносителя и интенсивного парообразования. Основные результаты этих исследований изложены в настоящей статье.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ЭВОЛЮЦИИ ПАРОВОЙ ПЛЕНКИ

В контексте сформулированных Х. Фауске в [9] условий триггеринга парового взрыва, приведенных ранее, начальные опыты были посвящены исследованию паровой пленки. Они проводились на нагретых выше температуры предельного перегрева воды неподвижных твердых медных полусферах диаметром 10 мм как с чистой рабочей поверхностью, так и с покрытиями, укрепленных на цилиндрических державках и погруженных в воду на глубину 5 мм [13, 14], а также на полностью погруженных в недогретую до температуры насыщения воду сферах из нержавеющей стали диаметром 11–25 мм [15]. В этих опытах в модельных условиях, которые можно было воспроизводить с достаточной точностью, изучались характеристики паровой пленки, ее эволюция во времени. Особое внимание уделялось возможности и условиям кратковременного касания холодной жидкостью сильно перегретой поверхности.

Схемы установок и основная диагностическая аппаратура описаны в [13, 15]. Краткие итоги выполненных наблюдений следующие.

В зависимости от сочетания значений температур поверхности горячей полусферы и воды (недогрева до температуры насыщения) наблюдались различные сценарии эволюции паровой пленки, окружающей горячую полусферу: от мелкомаштабных возмущений типа ряби или перемещающихся по довольно замысловатым траекториям изолированных паровых пузырьков до бегущих либо стоячих гармонических волн, амплитуда которых могла быть сравнимой (и это очень существенный факт) с толщиной паровой пленки. По-видимому, эти волны возникают под действием реактивных сил, сопровождающих поток испаряющейся жидкости с межфазной поверхности “паровая пленка – жидкость”. Эволюция пленки заканчивалась переходом к режиму пузырькового кипения. Характер перехода сильно зависел от состояния твердой поверхности и условий смачивания.

Толстые малотеплопроводные покрытия [в частности, напыленный слой Al_2O_3 толщиной более 0.1 мм с коэффициентом теплопроводности $1.4 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$] обеспечивали появление “холодных” смоченных пятен и спокойный сход паровой пленки (первый предельный случай). Паровая пленка была устойчивой и в другом предельном случае – чистой медной поверхности, гасящей любые локальные “провалы” температуры, связанные с приближением холодной жидкости к горячей поверхности сферы. Спокойный сход паровой пленки наблюдался и при малых недогревах воды до температуры насыщения, когда толщина паровой пленки была значительной [10, 16]. В подавляющем большинстве случаев, в том числе и на окислившейся естественным путем на воздухе медной поверхности (толщина оксидного слоя 0.10–0.15 мм), в ходе эволюции волнистых паровых пленок наблюдались взрывные выбросы в объем жидкости струй пара: одиночные, групповые, повторяющиеся во времени. Эти выбросы сопровождались импульсами давления разной интенсивности и звуковыми эффектами (щелчками, шипением типа сопровождающего кавитацию в аппаратах). Следует отметить, что по условиям эксперимента паровая пленка вблизи границы полусферы сообщалась с атмосферой. Это, несомненно, демпфировало интенсивность генерируемых гидродинамических и акустических эффектов. Следует отметить (и это очень важно), что в ходе экспериментов возможность кратковременного касания холодной жидкостью сильно перегретой металлической поверх-

ности была зафиксирована инструментально. Методика и анализ этих экспериментов описаны в [10, 14].

В опытах [15] сферы диаметром 11–25 мм были полностью погружены в воду. Сами сферы, в отличие от [13], были выполнены не из меди, а из нержавеющей стали, что усиливало неравновесность переходных процессов. Возмущения (рябь, видимое глазом помутнение поверхности паровой пленки) первоначально возникали в нижней части исходно спокойной паровой пленки. Они нарастали со временем (полное характерное время процесса составляло сотни миллисекунд), приобретали неупорядоченную хаотическую трехмерную структуру, нередко имели форму бегущих пузырей. Скорость перемещения элементов такой структуры по поверхности сферы составляла 200–250 м/с.

Таким образом, модельные опыты с твердыми сферами подтвердили реализацию первого и второго условий Х. Фауске, суть которых состоит в том, что при контакте горячих частиц, имеющих температуру выше точки гомогенного зародышеобразования холодной жидкости (сама холодная жидкость существенно недогрета до температуры насыщения), на поверхности этих частиц возникает неустойчивая паровая пленка, эволюция которой сопровождается ее разрушением и созданием возможности локального кратковременного контакта этих двух жидкостей и резкого, интенсивного образования паровой фазы.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ОДИНОЧНЫМИ КАПЛЯМИ РАСПЛАВОВ МЕТАЛЛОВ

Описанные в этом разделе опыты с одиночными каплями расплавов металлов, падающими в холодную воду, выявили картину волнообразования на поверхности паровой пленки, в целом аналогичную той, что наблюдалась в экспериментах с модельными твердыми образцами.

Серии опытов проводились с падающими в холодную воду одиночными каплями расплава различных веществ: олова, свинца, припоя ПОС-61 (61% Sn + 39% Pb), сплава Вуда (12.5% Sn + 25% Pb + 50% Bi + 12.5% Cd), сплава Розе (25% Sn + 25% Pb + 50% Bi), соли NaCl [17]. Фиксировалось наличие или отсутствие спонтанного микропарового взрыва на одиночной капле как такового, а далее изучалась возможность реализации триггеринга вскипания “цепного типа”, когда спонтанное резкое вскипание теплоносителя на одной капле возбуждает аналогичный процесс на соседних фрагментах, приводя всю совокупность капель к тонкой фрагментации и последующему паровому взрыву.

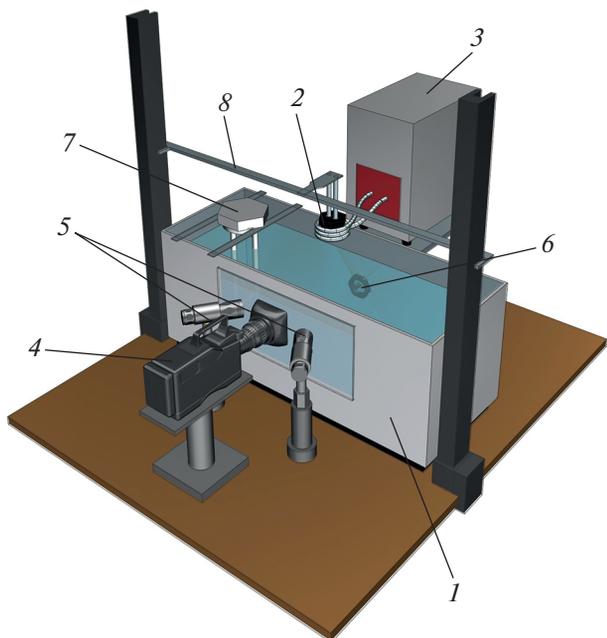


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.
 1 – емкость с дистиллированной водой (530 × 250 × 230 мм); 2 – графитовый тигель – генератор капель; 3 – индуктор; 4 – высокоскоростная видеокамера; 5 – фонари подсветки; 6 – датчик давления; 7 – электрический водонагреватель; 8 – механизм подъема графитовых стержней

Следует отметить, что в подавляющем большинстве описанных в литературе лабораторных экспериментов по паровому взрыву прибегали к использованию внешнего триггеринга: резкому перемещению поршня, разрыву диафрагмы, разделяющей рабочий объем и емкость с высоким давлением, “электрическому” взрыву проволоочки и другим подобным методам. Экспериментальные наблюдения развития спонтанной тонкой фрагментации капель горячей жидкости и последующего парового взрыва единичны [7, 10].

В ОИВТ РАН такие эксперименты проводились на установке, изображенной на рис. 1. В последующем эта же установка, но с измененной (двухполостной) конструкцией тигля – генератора капель использовалась при изучении процесса передачи возбуждающего тонкую фрагментацию импульса от одной капли к другой.

Капли расплава исследуемого вещества падали в холодную дистиллированную воду, имевшую заданную температуру, с высоты 50–70 мм. Капли с требуемой температурой получались в графитовом тигле (в отдельных случаях в атмосфере инертного газа) с помощью высокочастотного индуктора ВЧ-15АВ. Тигель имел форму параллелепипеда размерами 23 × 33 × 35 мм. Размер капель определялся

массой загружаемого исследуемого материала. Тигель мог иметь одну или две цилиндрические полости диаметром 10 мм с расстоянием между осями полостей 13 мм. Типичная масса загружаемого в каждую полость двухполостного тигля материала составляла 1–2 г и могла достигать 5.5 г в однополостном тигле. В нижней части полостей имелись сквозные отверстия диаметром 4 мм, закрытые до момента подачи жидкой капли в емкость с водой 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 вспомогательного электрического нагревателя. На боковой стенке емкости имелось стеклянное смотровое окно для видеосъемки процесса, которая осуществлялась скоростными видеокамерами Phantom v2012 или Phantom VEO 410s с частотой кадров до 180 кГц и временем экспозиции до 2 мкс. Циклическая запись результатов съемки осуществлялась в оперативную память камеры. На стенке емкости с водой на удалении около 20–30 мм от места ожидаемого взрыва капли был установлен высокочастотный пьезоэлектрический датчик давления РСВ 113В24 с резонансной частотой более 500 кГц.

На этой установке были проведены опыты с использованием расплавленных капель свинца, олова, припоя ПОС-61, сплавов Вуда и Розе, соли NaCl. Из нескольких десятков экспериментов, проведенных с металлами и их сплавами, спонтанный взрыв наблюдался лишь дважды в опытах со сплавом Розе и несколько раз с неокисленным оловом, причем при ударе капли олова о днище сосуда, т.е. фактически в условиях внешнего триггеринга. Единственным веществом, капли которого спонтанно взрывались практически со 100%-ной вероятностью, была соль NaCl [17]. Это происходило при температуре капель расплава $t_{\text{NaCl}} = 850\text{--}1100^\circ\text{C}$ (температура плавления NaCl – 801°C) и температуре воды менее 70°C . По-видимому, решающую роль в обеспечении практически 100%-ной вероятности взрыва играет высокая растворимость соли в воде, приводящая к улучшению взаимного проникновения частиц растворителя и растворяемого вещества.

В то же время “гарантированное” наступление спонтанного парового взрыва позволило сосредоточить внимание на отдельных деталях процесса спонтанного триггеринга, прежде всего на передаче возбуждающего процесс импульса с одной капли на другую. С этой целью на установке (см. рис. 1) были использованы графитовые тигли с двумя сквозными отверстиями, обеспечивающими одновременную генерацию двух капель горя-

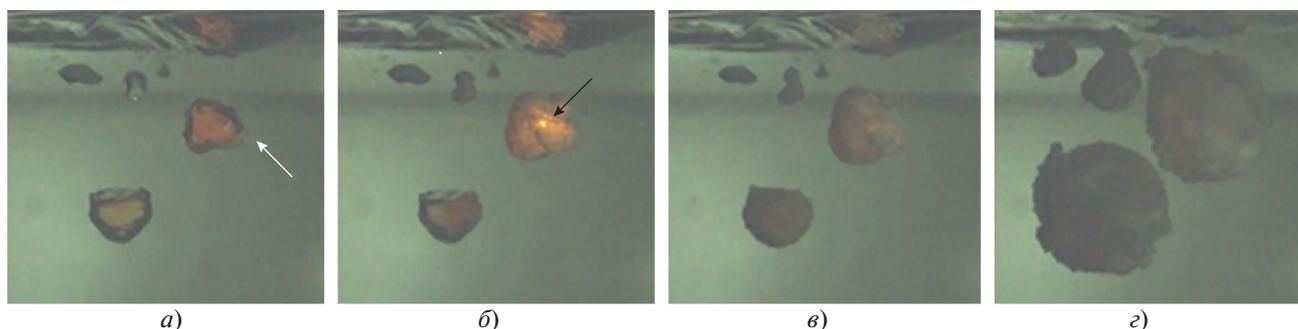


Рис. 2. Спонтанный паровой взрыв каплей расплава NaCl в воде ($t_{\text{в}} = 23^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 910^{\circ}\text{C}$). Экспозиция – 10 мкс. Размер кадров 44×40.5 мм. Белой стрелкой отмечено место триггеринга, черной стрелкой – кратковременная световая вспышка.

a – момент самопроизвольного триггеринга на первой капле; время от кадра *a*, мкс: *b* – 60; *v* – 100; *z* – 380

чей жидкости. Типичная картина эволюции и последовательности взрывов каплей иллюстрируется в приложенном к статье видео² № 1, кадры из которого представлены на рис. 2. Как правило, капли поступали в емкость с недогретой до температуры насыщения водой не одновременно, а с временным интервалом 20–50 мс. Размер каплей варьировался изменением массы NaCl. Типичный размер каплей составлял 10–15 мм. После входа в воду капли могли разделиться на две-три части, которые существовали независимо либо повторно сливались воедино. После входа в воду капли покрывались паровой оболочкой (см. рис. 2, *a*). Общий объем композиции “расплавы соли – пар” примерно в 2 раза превышал объем содержащейся в нем соли. Тонкую структуру такой композиции определить было невозможно с помощью имевшегося диагностического оборудования, что оставляет определенную свободу для фантазии при феноменологическом описании явления, особенно с учетом хорошей растворимости соли в воде.

Инкубационный период до начала спонтанного триггеринга тонкой фрагментации капли соли и парового взрыва составлял десятки миллисекунд, иногда доходя до нескольких сот миллисекунд. Какой-либо зависимости продолжительности инкубационного периода от сочетания температур расплава соли и воды в емкости не прослеживалось. Наличие той или иной системы не наблюдалось и в очередности взрыва каплей: капля, поступившая в воду позже, могла взорваться первой. Две капли, имевшие своим источником единую распавшуюся “материнскую” каплю, также взрывались не одновременно, а с произвольной очередностью.

Триггеринг начинался с локального возникновения и развития волн на поверхности компози-

ции “расплавы соли – пар”. Картина в большой степени напоминала наблюдавшуюся на твердых модельных образцах, описанную ранее. Затем появлялось характерное короткоживущее (в течение одного кадра видеосъемки, т.е. не более 20 мкс) локальное светящееся пятно (указано белой стрелкой) характерным размером примерно 1 мм, которое может быть связано с кавитационной люминесценцией [18]. На рис. 2, *b* это пятно указано черной стрелкой. Далее следовал микропаровой взрыв. В опытах авторов настоящей статьи наличие такого пятна прослеживалось в начале микровзрыва всех каплей. Упоминания о пятне имеются также в обзоре [1]. При экспериментальных наблюдениях указанное пятно может служить своего рода индикатором процесса спонтанного триггеринга.

Микропаровой взрыв капли сопровождался всплеском давления в несколько десятых мегапаскаля (несколько атмосфер), фиксированным датчиком давления (рис. 3). Типичная скорость нарастания давления на переднем фронте акустиче-

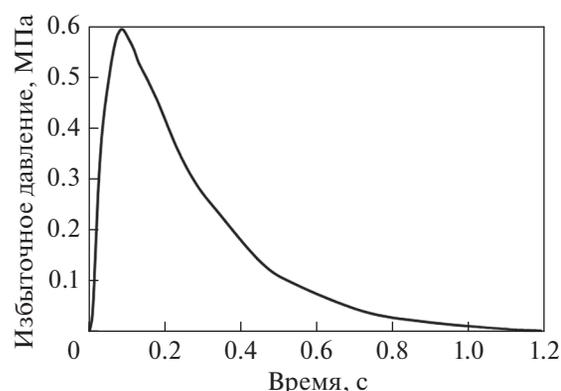


Рис. 3. Характерное изменение избыточного давления в воде в процессе парового взрыва на каплях расплава NaCl ($t_{\text{в}} = 19^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 1100^{\circ}\text{C}$)

² Видео можно посмотреть на сайте <https://www.springer.com/journal/11509>.



Рис. 4. Спонтанный паровой взрыв двух капель расплава NaCl в воде ($t_{\text{в}} = 18^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 980^{\circ}\text{C}$). Экспозиция – 18.7 мкс. Размер кадров 40×30 мм. Белыми стрелками отмечены места триггеринга на каплях. *a* – момент самопроизвольного триггеринга на первой капле; время от кадра *a*, мкс: *b* – 380; *v* – 1380; *z* – 1980

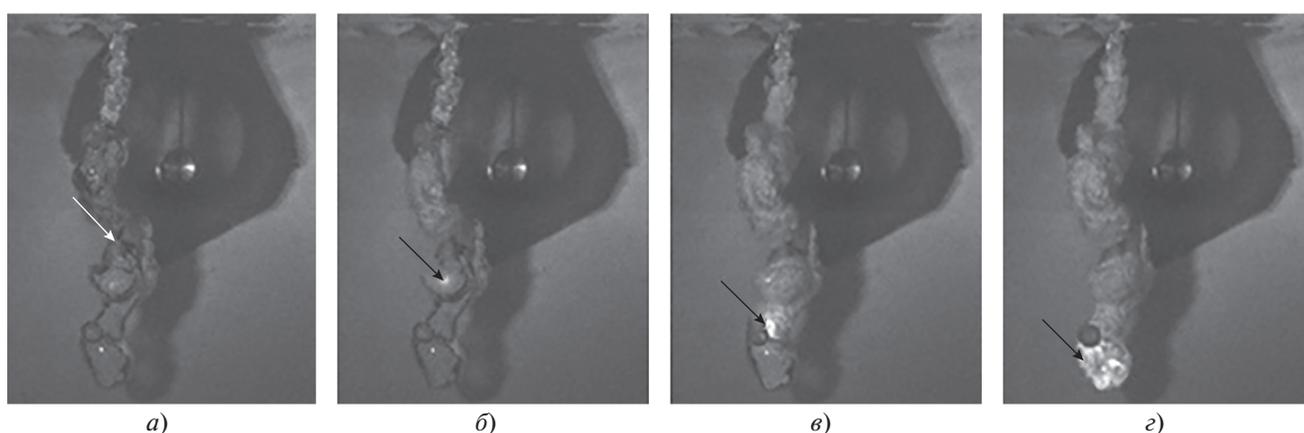


Рис. 5. Паровой взрыв на струе расплава NaCl в воде ($t_{\text{в}} = 50^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 1100^{\circ}\text{C}$). Экспозиция – 4.7 мкс. Размер кадров 45.1×55.5 мм. Белой стрелкой отмечено место триггеринга, черными стрелками – кратковременные световые вспышки. На заднем плане виден датчик давления с элементом крепления на стенке (см. поз. *b* на рис. 1). *a* – момент самопроизвольного триггеринга на первой капле; время от кадра *a*, мкс: *b* – 55; *v* – 88; *z* – 99

ской волны составляла около 0.01 МПа/мс. Через 100–130 мкс эти же процессы повторялись на второй капле (см. рис. 2, *v*). Временная пауза между этими двумя микровзрывами (время передачи импульса давления) хорошо коррелирует со значением скорости звука в воде.

На рис. 4 процесс передачи импульса приведен для комбинации капель с другой температурой расплава соли. В целом картина процесса повторилась.

Интересно отметить один весьма любопытный факт. Ранее говорилось, что попавшая в воду капля расплава зачастую делилась на несколько частей, находившихся по соседству, которые могли повторно сливаться и образовывать структуры как правильной, так и довольно причудливой формы. В этом случае “цепная” передача триггеринга по поверхности такой структуры, как правило, также сопровождалась чередой световых

вспышек (это явление иллюстрируется приложенным видео № 2 и рис. 5).

Таким образом, в лабораторных условиях удалось зафиксировать некоторые детали самопроизвольного триггеринга и передачу возбуждающих процесс парового взрыва эффектов от одного горячего фрагмента к другому, т.е. в какой-то мере воспроизвести элементарный акт цепной реакции. Однако всегда нужно отдавать себе отчет, что паровой взрыв – это стохастическое явление, где роль масштабного фактора очень велика, и далеко не все происходящее в реальных условиях может быть воспроизведено и реализовано в лабораторных экспериментах.

ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты экспериментальных исследований спонтанного триггеринга парового взрыва, полученные в лабораторных условиях

взаимодействия капель расплава соли NaCl с холодной водой (получены впервые).

2. Спонтанному триггерингу парового взрыва предшествуют развитие сильных, неупорядоченных, трехмерных возмущений паровой пленки, образующейся на горячих фрагментах на этапе предварительного перемешивания, и разрушение этой пленки.

3. Существует множество моделей, описывающих подпроцесс тонкой фрагментации горячих фракций, среди которых сегодня трудно указать наиболее вероятную. По-видимому, этот факт — следствие реально существующего многообразия вариантов данного подпроцесса.

4. В некоторых случаях, например при взаимодействии капель расплава NaCl с водой, спонтанный триггеринг парового взрыва и передача возбуждающих спонтанное взрывное парообразование холодной жидкости импульсов от одного горячего фрагмента к другому могут быть воспроизведены в лабораторных условиях.

5. Спонтанный триггеринг сопровождается характерным ростом давления и люминесцентными вспышками.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность доктору техн. наук Ю.П. Ивочкину за ценные советы и полезные обсуждения результатов исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fletcher D.F., Theofanous T.G.** Heat transfer and fluid dynamic aspects of explosive melt–water interactions // *Adv. 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. **Berthoud G.** Vapor explosions // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2000. V. 32. Is. 1. P. 573–611. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.573>
3. **Kim B., Corradini M.L.** Modeling of small-scale single droplet fuel / Coolant interactions // *Nucl. Sci. Eng.* 1988. V. 98. Is. 1. P. 16–28. <https://doi.org/10.13182/NSE88-A23522>
4. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е.** Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов. М.: Изд-во ИПМех РАН, 2020.
5. **Status of steam explosion understanding and modelling / R. Meignen, B. Raverdy, M. Buck, G. Pohlner, P. Kudinov, W. Mac, C. Brayer, P. Piluso, S.-W. Hong, M. Leskovar, M. Ursic, G. Albrecht, I. Lindholm, I. Ivanov // Ann. Nucl. Energy.** 2014. V. 74. P. 125–133. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.008>
6. **Eckhoff R.K.** Water vapour explosions – A brief review // *J. Loss Prev. Process Ind.* 2016. V. 40. P. 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.jlpi.2015.11.017>
7. **Heat transfer considerations on the spontaneous triggering of vapor explosions – A review / A. Simons, I. Bellemans, T. Crivits, K. Verbeken // Met.** 2021. V. 11. Is. 1. 55. <https://doi.org/10.3390/met11010055>
8. **New insights into physics of explosive water boiling derived from molecular dynamics simulations / M. Ilic, V.D. Stevanovic, S. Milivojevic, M.M. Petrovic // Int. J. Heat Mass Transfer.** 2021. V. 172. P. 121141. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121141>
9. **Fauske H.** Liquid metal boiling in relation to LMBFBR safety design // *Proc. of the Intern. Conf. on Safety of Fast Reactors.* Aix-En-Provence, France, 19–22 Sept. 1967.
10. **Ивочкин Ю.П.** Исследование механизмов термогидродинамических и МГД процессов с жидкометаллическими рабочими телами: дис. ... докт. техн. наук. М.: ОИВТ РАН, 2015.
11. **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>
12. **Huhtiniemi I., Magallon D., Hohmann H.** Results of recent KROTOS FCI tests: alumina versus corium melts // *Nucl. Eng. Des.* 1999. V. 189. Is. 1–3. P. 379–389. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(98\)00269-6](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(98)00269-6)
13. **Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду / В.С. Григорьев, В.Г. Жилин, Ю.А. Зейгарник, Ю.П. Ивочкин, В.В. Глазков, О.А. Синкевич // ТВТ.** 2005. Т. 43. № 1. С. 100–114.
14. **Экспериментальное исследование характеристик взрывного вскипания недогретой воды на горячей поверхности при смене режимов кипения / В.Г. Жилин, Ю.А. Зейгарник, Ю.П. Ивочкин, А.А. Оксман, К.И. Белов // ТВТ.** 2009. Т. 47. № 6. С. 891–898.
15. **Исследование быстропротекающих процессов при кипении недогретой воды / А.М. Агальцов, С.Н. Вавилов, Ю.А. Зейгарник, С.А. Ковалев // Вестник МЭИ.** 2013. № 4. С. 59–63.
16. **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.
17. **Вавилов С.Н., Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А.** Паровой взрыв: экспериментальные наблюдения // *Теплоэнергетика.* 2022. № 1. С. 78–84. <https://doi.org/10.1134/S0040363621110072>
18. **Гидродинамическая люминесценция и гамма-излучение / Д.А. Бирюков, М.И. Власова, Д.Н. Герасимов, О.А. Синкевич // Вестник МЭИ.** 2013. № 1. С. 69–72.

Spontaneous Triggering of Vapor Explosion: Results of Experimental Studies

S. N. Vavilov^a, N. V. Vasil'ev^{a, b, *}, Yu. A. Zeigarnik^a, A. V. Klimenko^c, and D. A. Skibin^d

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

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

^c *National University of Science and Technology (MISIS), Moscow, 119049 Russia*

^d *OOO S7 Space Transport Systems, Moscow, 107031 Russia*

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

Abstract—In the paper, the results of experimentally studying of spontaneous vapor explosion triggering are presented. They were obtained under model conditions when heated solid hemispherical samples were used and under laboratory conditions during the interaction of molten NaCl droplets with a distilled water pool at 15–70°C. It is shown that the development of violent, disordered 3-D perturbations (oscillations) of the vapor film surface precedes spontaneous vapor explosion triggering. Such oscillations are accompanied by vapor destruction film and the creation of local short-term contacts of hot and cold fractions and intense, explosion-like formation of a vapor phase of the volatile fraction. The experiments also showed that, under laboratory conditions, spontaneous vapor explosion at the molten droplets of usual metals and alloys (lead, tin, POS-61 solder, Wood's and Rose's alloys, etc.) occurred very seldom and researchers are forced to apply an external triggering to provide a vapor explosion. At the same time, during the interaction of NaCl melt with water spontaneous vapor explosion, triggering was practically attained with a probability of 100%. It was also shown that, during the simultaneous interaction of several NaCl melt droplets with water, the spontaneous vapor explosion triggering that has been originated at one of the droplets after a time lag of some tens of microseconds provokes explosion-like water evaporation at the other droplets also. Spontaneous triggering is accompanied by a typical sharp pressure pulse in the working medium and luminescent flashes at the molten droplet surfaces. The thesis was postulated that there is no common mechanism of fine hot fraction fragmentation, which is true for any situations and regime conditions.

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