

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПАРОВОГО ВЗРЫВА ПОСЛЕ САМОПРОИЗВОЛЬНОГО ТРИГГЕРИНГА НА РАСПЛАВЛЕННЫХ КАПЛЯХ СОЛИ И ОЛОВА

Н.В. Васильев

nikvikvas@mail.ru

С.Н. Вавилов

sergeynv@mail.ru

Ю.А. Зейгарник

zeigar@oivtran.ru

ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Явление парового взрыва (взрывного вскипания низкокипящей жидкости при погружении в нее сильно нагретого расплава) может возникать при авариях в некоторых существующих и перспективных технологических процессах — на атомных электростанциях, в металлургии, при производстве целлюлозы. Приведены результаты экспериментального исследования наименее изученных стадий процесса парового взрыва — триггеринга (иницирования) и тонкой фрагментации расплава. В качестве материалов расплавов использованы поваренная соль NaCl и олово Sn. Использование капель расплава соли обусловлено практически «гарантированной» реализацией самопроизвольного триггеринга, что позволяло приблизить условия эксперимента к реальным по сравнению с применяемым в большинстве исследований внешним (принудительным) триггерингом. Показано, что при взаимодействии нескольких капель расплава соли с водой самопроизвольный триггеринг (микровзрывное вскипание холодной жидкости), произошедший на одной капле, вызывал «цепную реакцию» микропаровых взрывов на соседних каплях. Аналогичная «цепная реакция» микровзрывов имеет место и от капель соли к каплям олова (вероятность самопроизвольного триггеринга расплавленных капель олова в воде весьма низка). В качестве основного инструмента исследования ввиду быстротечности (десятки–сотни мкс)

Ключевые слова

Паровой взрыв, недогретая вода, расплавленные капли, соль, олово, самопроизвольный триггеринг, высокоскоростная видеосъемка

изучаемых процессов использована высокоскоростная видеосъемка с частотой кадров до 180 кГц и временем экспозиции до 2 мкс

Поступила 15.03.2023

Принята 02.05.2023

© Автор(ы), 2023

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России
(госзадание № 075-01129-23-00)*

Введение. Паровой взрыв — опасное явление, возникающее при контакте сильно нагретого расплава с низкокипящей жидкостью, в основном с недогретой до температуры насыщения водой, которое может наблюдаться в атомной энергетике при попадании кориума (расплава активной зоны) в воду при тяжелой аварии на АЭС, в металлургической и целлюлозной отраслях промышленности, при технологических операциях и транспортировке сжиженного газа. Интенсивное образование больших объемов пара и резкий рост давления в пространстве ограниченных размеров вследствие взрывного вскипания холодной жидкости могут привести к разрушительным последствиям.

Исследованию парового взрыва посвящено много как экспериментальных, так и расчетно-теоретических работ [1–5]. Однако феноменологическое понимание этого нетривиального процесса из области изучения гидродинамики и теплообмена в многофазных средах до сих пор остается неполным и недостаточным для описания даже сложными, учитывающими множество факторов математическими моделями [6–8]. Процесс парового взрыва принято подразделять на четыре стадии: 1) начальное грубое перемешивание струи расплава (премиксинг); 2) инициирование взрыва (триггеринг); 3) тонкая фрагментация капель расплава (резкое увеличение площади горячей поверхности с взрывной генерацией большой массы пара, зачастую сопровождаемое распространением мощной ударной волны); 4) расширение продуктов взрыва в окружающем пространстве. В настоящее время особенно много недостаточно исследованных вопросов приходится на начальные стадии парового взрыва — его инициирования (триггеринга) и тонкой фрагментации капель горячего расплава. В частности, отсутствуют экспериментальные данные по передаче импульса парового взрыва между отдельными каплями расплава. В литературе представлено более десятка гипотез, описывающих предполагаемый механизм тонкой фрагментации горячих капель, что свидетельствует о недостаточности знаний о процессе [9]. Наиболее распространенные гипотезы: гидродинамическая [10], термомеханическая [11] и кавитационно-акустическая [12].

Экспериментальные исследования процессов, происходящих при триггеринге парового взрыва, наиболее целесообразно проводить с одиноч-

ными каплями расплава или с группой капель (массой несколько грамм). Так, в [13–17] в качестве капель расплавленного вещества использованы олово и медь. Одними из наиболее скрупулезно выполненных работ с одиночными каплями расплавов являются работы сотрудников Королевского технологического института Стокгольма на установке MISTEE (Micro Interactions in Steam Explosion Experiments) [15, 18, 19]. С помощью одновременного использования скоростной видеосъемки (с максимальной частотой кадров до 20 кГц) и рентгеновского просвечивания (с максимальной частотой записи до 8 кГц) удалось отследить эволюцию расплавленной капли и паровой пленки отдельно. Эксперименты в [18, 19] проведены на каплях расплава бинарной оксидной смеси WO_3 – CaO , что позволило несколько приблизиться по свойствам к расплаву кориума (UO_2 – ZrO_2). Однако в качестве серьезного недостатка перечисленных работ следует отметить применение внешнего (искусственного) триггеринга процесса, позволявшее получить выгоду с методической стороны вопроса, но нарушавшее «естественный» ход процесса. Ввиду быстротечности процессов, происходящих на стадиях триггеринга и тонкой фрагментации капель (десятки–сотни мкс), следует применять более высокоскоростную съемку (желательно от 50 кГц и более), чтобы процесс можно было детализировать хотя бы по нескольким кадрам, что делалось далеко не всегда.

Цель работы — описание явлений, наблюдаемых на стадии триггеринга парового взрыва и полученных в условиях самопроизвольного его зарождения (так называемого спонтанного триггеринга). Для исключения эффектов, связанных с внешним триггерингом, который использовался и будет использоваться в большей части исследований, учтен установленный ранее факт практически 100%-ной вероятности самопроизвольного триггеринга парового взрыва при взаимодействии расплавленных капель соли $NaCl$ с холодной водой [20]. Тем самым в определенной степени в «однородных» условиях удалось наблюдать и описать «цепную реакцию» микровзрывов воды на группе капель соли и аналогичную передачу взрывов от капель соли к каплям олова Sn (вероятность самопроизвольного триггеринга расплавленных капель олова в воде весьма низка). В качестве основного инструмента исследования использована высокоскоростная видеосъемка процесса (с частотой кадров до 180 кГц и временем экспозиции до 2 мкс). Таким образом, существующие и в известной степени весьма логичные соображения о процессах на стадии триггеринга парового взрыва получили экспериментальное подтверждение в достаточно схожих условиях.

Экспериментальная установка и методика исследования. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Дистиллированную воду наливали примерно до уровня 200 мм в емкость размерами 250 × 530 × 230 мм из коррозионно-стойкой стали. Для возможности визуализации процесса с использованием видеосъемки на боковой стенке емкости предусмотрено стеклянное окно.

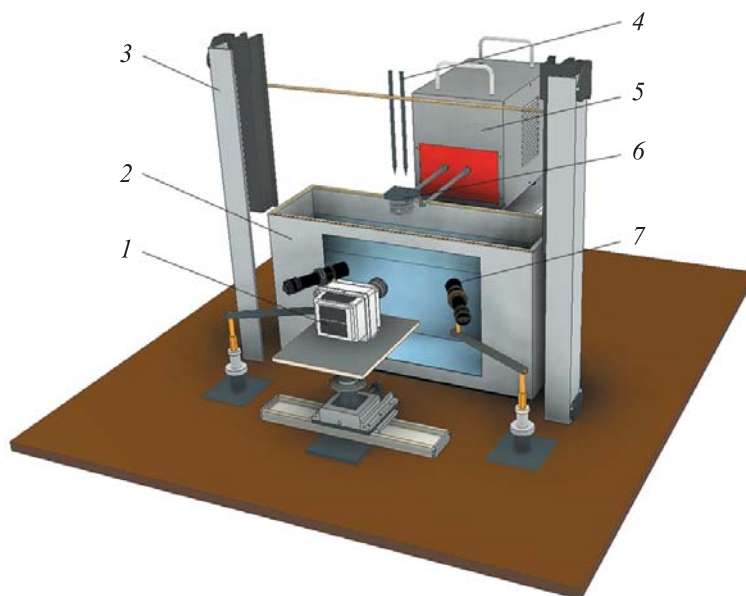


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 — высокоскоростная видеокамера; 2 — емкость с дистиллированной водой;
 3 — вертикальное линейное подвижное устройство; 4 — стержни из графита;
 5 — ВЧ-индуктор; 6 — графитовый тигель; 7 — фонари подсветки

Расплавленные капли соли и олова поступали в воду из устьев графитового тигля (см. рис. 1), расположенного на расстоянии 60...80 мм над свободной поверхностью воды. Использование графитового тигля позволило существенно снизить вероятность окисления исследуемых расплавляемых веществ при нагреве. Тигель имел форму прямоугольного параллелепипеда высотой 35 мм, шириной 33 мм и толщиной 23 мм. Внутри тигля высверлены две цилиндрические полости диаметром 10 мм и глубиной 30 мм, расстояние между осями которых составляло 13 мм. В нижней части обеих полостей выполнены сквозные отверстия диаметрами 4 мм, которые до момента подачи капель в емкость с водой закрывались графитовыми цилиндрическим стержнями с наконечниками конической формы. Подача расплавленных капель осуществлялась при подъеме графитовых стержней с помощью специального автоматизиро-

ванного механизма в виде линейного подвижного устройства, работающего от источника постоянного тока.

Эксперименты проводили при температуре воды $t_b = 20...25$ °С. Нагрев тигля до температуры 850...1150 °С для плавления в нем соли и олова (температура плавления соли 801 °С, температура плавления олова ~ 231 °С) осуществляли с использованием высокочастотного индукционного нагревателя ВЧ-15АВ (ВЧ-индуктора). Температуру в тигле и температуру воды в емкости измеряли хромель-алюмелевыми термопарами. Масса соли и олова, загружаемых в каждое устье тигля, варьировалась в пределах 1...2 г.

Для измерения давления в системе на фронтальной (относительно плоскости съемки) дальней стенке емкости устанавливали высокочастотный (с резонансной частотой ≥ 500 кГц) пьезоэлектрический датчик модели РСВ 113В24.

С использованием высокоскоростных видеокамер — монохромной *Phantom v2012* или цветной *Phantom VEO 410s* — проводилась видеосъемка процесса с максимальной частотой кадров до 180 кГц и минимальным временем экспозиции до 2 мкс. Подсветка осуществлялась двумя мощными светодиодными фонарями максимальной яркостью 1000 лм каждый. В отдельных экспериментах для улучшения освещения использовали дополнительные фонари, погруженные в емкость с водой.

Результаты исследования и обсуждение. Типичные кадры высокоскоростной видеосъемки процесса передачи импульса парового взрыва после самопроизвольного триггеринга между расплавленными каплями соли показаны на рис. 2. После входа в воду капли могли делиться на несколько частей, которые существовали независимо или повторно сливались воедино (четыре отдельных капли размерами 3...8 мм, рис. 2, а). Время от падения капель в воду до начала самопроизвольного триггеринга составляло от нескольких десятков до сотен миллисекунд. Триггеринг начинался с локального возникновения возмущений паровой пленки вокруг одной из расплавленных капель (место триггеринга показано белой стрелкой, см. рис. 2, а). Через некоторый небольшой промежуток времени, составлявший несколько десятков микросекунд, эти возмущения распространялись на всю поверхность капли (рис. 2, б–в). Картина в большой степени напоминала картину, наблюдавшуюся на твердых нагретых сферах [21]. Затем появлялось характерное кратковременное (в течение одного кадра видеосъемки, т. е. не более 20 мкс) локальное светящееся пятно характерным размером примерно 1 мм (рис. 2, г), которое может быть связано с кавитационной люминисценцией. Далее следовало начало

парового взрыва, сопровождающееся интенсивным ростом объема пара. Светящееся пятно наблюдалось в достаточно большом числе опытов на каплях соли. Упоминания о нем имеются и в [1]. Затем процесс взрывного парообразования распространялся на соседние капли (рис. 2, д). Временная пауза между микровзрывами на соседних каплях (время передачи импульса давления) приемлемо коррелирует со скоростью звука в воде.

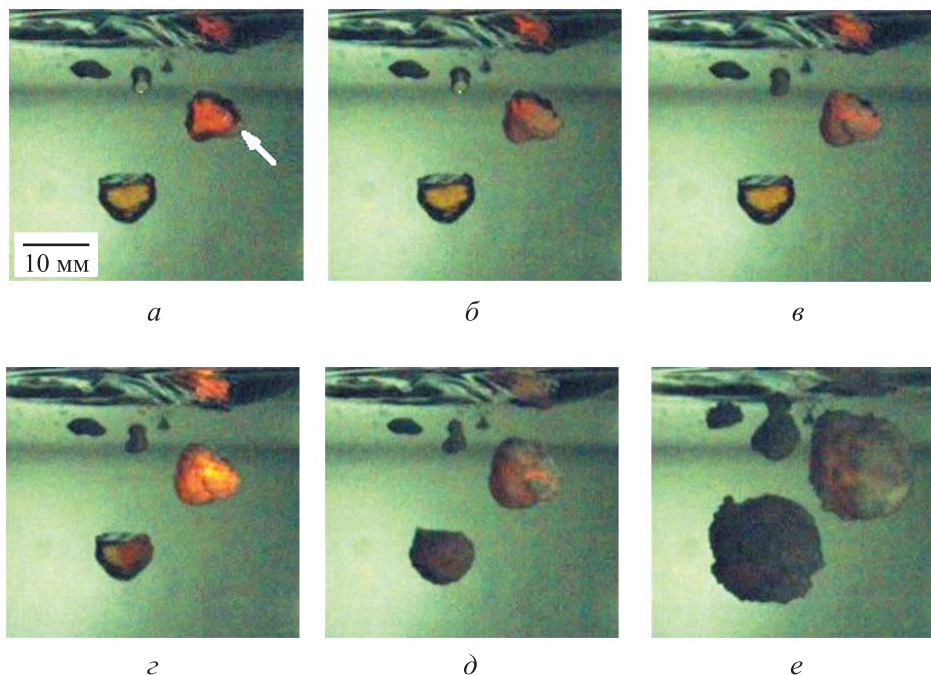


Рис. 2. Распространение парового взрыва между каплями соли ($t_{\text{в}} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 910 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в тигле; время экспозиции 10 мкс; размер кадра $44 \times 40,5 \text{ мм}$):
время от начала триггеринга на первой капле (а), мкс: б — 20; в — 40;
г — 60; д — 100; е — 300

Следует отметить, что взрывное парообразование на первой капле происходило через несколько кадров после начала локальных возмущений паровой пленки (см. рис. 2, а-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 (см. рис. 2, д). Ускорение процесса на последующих каплях возможно стало следствием волны давления, распространяющейся в жидкости после взрыва на первой капле и побуждающей к контакту холодной воды с горячим расплавом.

Кадры последовательного распространения микровзрывов между каплями соли NaCl представлены на рис. 3. После падения в воду сформирова-

лись пять обособленных капель, отделенных паровым слоем от жидкости (рис. 3, *a*). Время между падением первой и последней капли (нумерация капель приведена на рис. 3, *a*) в воду составляло примерно 100 мс. Момент самопроизвольного микровзрывного вскипания холодной жидкости на первой капле соли NaCl показан на рис. 3, *a*. За шесть кадров до этого на ней появились локальные возмущения паровой пленки, т. е. время от начала триггеринга до взрыва на первой капле составило примерно 200 мкс. Момент передачи взрыва на близлежащую вторую каплю и начало возмущений паровой пленки на третьей капле показаны на рис. 3, *б*. Следующие два кадра иллюстрируют моменты передачи взрыва на третью (рис. 3, *в*) и четвертую (рис. 3, *г*) капли и начало возмущений паровой пленки на четвертой (см. рис. 3, *в*) и пятой (см. рис. 3, *г*) каплях. Процесс взрыва, распространяемый на самую дальнюю пятую каплю, показан на рис. 3, *д*. Время между кадрами на рис. 3, *a* и *д* составляет примерно 165 мкс: визуально наблюдается «цепная реакция» самопроизвольных возмущений паровых пленок, окружающих капли.

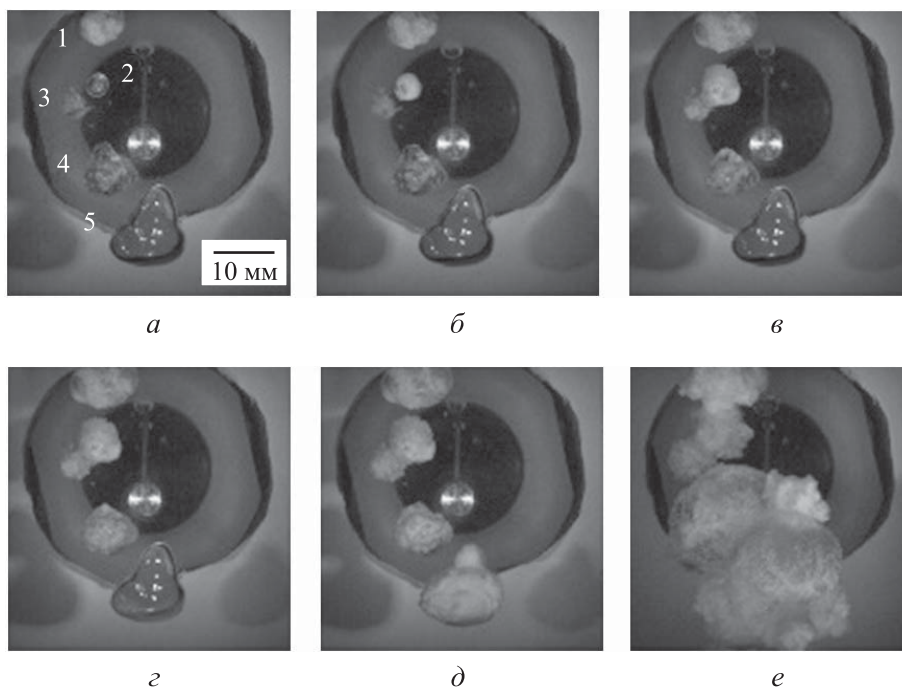


Рис. 3. Распространение парового взрыва между каплями соли NaCl ($t_{\text{в}} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в тигле; время экспозиции 10 мкс; размер кадра $43,5 \times 43,5$ мм): время от парового взрыва на первой капле (*a*), мкс: *б* — 33; *в* — 99; *г* — 132; *д* — 165; *е* — 495; на заднем плане показан датчик давления с элементом крепления на стенке; 1–5 — номера капель

Наблюдается «мгновенная» (за 1–2 кадра) передача парового взрыва от первой капли к соседним (см. рис. 2, 3), в то время как взрывное парообразование на первой капле после возникновения локальных возмущений распространяется на всю поверхность паровой пленки за шесть кадров (~ 200 мкс). При использовании внешнего искусственного триггеринга процесс будет развиваться аналогично происходящим процессам на второй–пятой каплях (см. рис. 3). Таким образом, использование внешнего триггеринга отдаляет эксперимент от реальных условий, так как не позволяет получить в нем стадию локальных возмущений паровой пленки, происходящих при самопроизвольном триггеринге на первой капле.

В следующей серии экспериментов наблюдалась передача триггеринга с капли соли NaCl на капли расплавленного металла, что в каком-то аспекте ближе к большинству реальных условий возникновения парового взрыва. В качестве металла использовано олово — одно из наиболее часто применяемых веществ в таких исследованиях. Предыдущие опыты на каплях олова в условиях отсутствия внешнего триггеринга процесса показали низкую вероятность реализуемости парового взрыва. Поэтому для создания импульса, возбуждающего триггеринг на каплях олова, использован практически «гарантированный» самопроизвольный паровой взрыв на соседней капле соли NaCl. Этот метод наиболее приближен к реальным условиям, чем внешний искусственный триггеринг (резкое перемещение поршня, разрыв диафрагм, разделяющих рабочий объем и емкость с высоким давлением, «электрический» взрыв проволоки). Реализация предложенного метода осуществлялась посредством описанной выше экспериментальной методики одновременной генерации капель расплавов соли и олова в соседних отверстиях двуполостного тигля.

Кадры распространения парового взрыва между каплями соли NaCl и олова приведены на рис. 4. После попадания расплава в воду сформировались три отдельных капли соли и две олова (рис. 4, а). Момент микро-взрыва на первой капле соли (NaCl-1) показан на рис. 4, б, момент передачи взрыва на близлежащую вторую каплю соли (NaCl-2) — на рис. 4, в, дальнейшее распространение процесса на третью каплю соли (NaCl-3) и первую каплю олова (Sn-1) — на рис. 4, г, д. Процесс парового взрыва (рис. 4, е) происходит на самой удаленной от первой капли NaCl второй капле олова (Sn-2). Отметим быстротечность процесса: между кадрами на рис. 4, а и е прошло около 400 мкс.

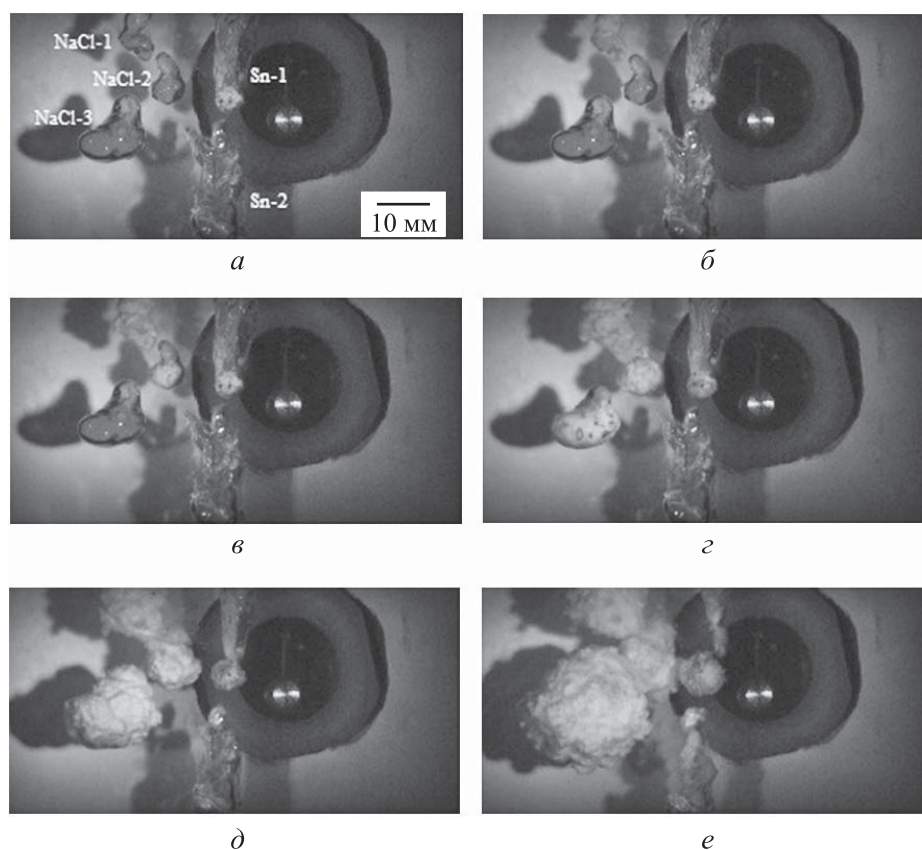


Рис. 4. Распространение парового взрыва между каплями соли NaCl и олова Sn ($t_{\text{в}} = 23 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = t_{\text{Sn}} = 1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в тигле; время экспозиции 10 мкс; размер кадра $87 \times 43,5 \text{ мм}$):

время от момента парового взрыва на первой капле (a), мкс: б — 33; в — 66; г — 132; д — 231; е — 396; на заднем плане показан датчик давления с элементом крепления на стенке

Заключение. С использованием высокоскоростной видеосъемки продемонстрирована «цепная реакция» передачи импульса парового взрыва между отдельными каплями расплавов соли NaCl и олова от места начального самопроизвольного триггеринга на капле соли NaCl. Инструментальное (визуальное) подтверждение логических построений, полученное в условиях самопроизвольного инициирования процесса, существенно более близких к реальности, чем эксперименты с использованием внешнего (искусственного) триггеринга, очень важно для построения адекватных реальности феноменологических моделей явления.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fletcher D.F., Theofanous T.G. Heat transfer and fluid dynamic aspects of explosive melt–water interactions. *Adv. Heat Transf.*, 1997, vol. 29, pp. 129–213. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70185-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70185-0)
- [2] Meignen R., Raverdy B., Buck M., et al. Status of steam explosion understanding and modelling. *Ann. Nucl. Energy*, 2014, vol. 74, pp. 125–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.008>
- [3] Shen P., Zhou W., Cassiaut-Louis N., et al. Corium behavior and steam explosion risks: a review of experiments. *Ann. Nucl. Energy*, 2018, vol. 121, pp. 162–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.07.029>
- [4] Simons A., Bellemans I., Crivits T., et al. Heat transfer considerations on the spontaneous triggering of vapor explosions — a review. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 1, art. 55. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11010055>
- [5] Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Термическое взаимодействие высокотемпературных расплавов с жидкостями. *ТБТ*, 2022, т. 60, № 2, с. 280–318.
- [6] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. The adaptive composite block-structured grid calculation of the gas-dynamic characteristics of an aircraft moving in a gas environment. *Mathematics*, 2022, vol. 10, iss. 12, art. 2130. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10122130>
- [7] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Calculation of heat transfer and drag coefficients for aircraft geometric models. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, iss. 21, art. 11011. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122111011>
- [8] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Starostin A.V. Development of a mathematical model and the numerical solution method in a combined impact scheme for MIF target. *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 325–341. DOI: <https://doi.org/10.20537/nd200207>
- [9] Ивочкин Ю.П., Зейгарник Ю.А., Кубриков К.Г. Механизмы тонкой фрагментации горячего расплава, погруженного в холодную воду. *Теплоэнергетика*, 2018, № 7, с. 64–75. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363618070020>
- [10] Kim B., Corradini M.L. Modeling of small-scale single droplet fuel/coolant interactions. *Nucl. Sci. Eng.*, 1988, vol. 98, iss. 1, pp. 16–28. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE88-A23522>
- [11] Cronenberg A.W., Chawla T.C., Fauske H.K. A thermal stress mechanism for the fragmentation of molten UO₂ upon contact with sodium coolant. *Nucl. Eng. Des.*, 1974, vol. 30, iss. 3, pp. 433–443. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(74\)90228-3](https://doi.org/10.1016/0029-5493(74)90228-3)
- [12] Kazimi M.S., Autruffe M.I. On the mechanism for hydrodynamic fragmentation. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 1978, vol. 30, pp. 366–367.
- [13] Dullforce T.E., Buchanan D.J., Perckover R.S. Self-triggering of small-scale fuel-coolant interactions: I. Experiments. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1974, vol. 9, no. 9, pp. 1295–1303. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/9/9/006>

- [14] Wang C., Wang C., Chen B., et al. Fragmentation regimes during the thermal interaction between molten tin droplet and cooling water. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2021, vol. 166, art. 120782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120782>
- [15] 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, vol. 29, iss. 3, pp. 351–361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.05.013>
- [16] Zyszkowski W. Study of the thermal explosion phenomenon in molten copper — water system. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1976, vol. 19, iss. 8, pp. 849–868. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(76\)90197-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(76)90197-6)
- [17] Song J., Wang C., Chen B., et al. Phenomena and mechanism of molten copper column interaction with water. *Acta Mech.*, 2020, vol. 231, no. 6, pp. 2369–2380. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02667-x>
- [18] Hansson R.C., Dinh T.N., Manickam L.T. A study of the effect of binary oxide materials in a single droplet vapor explosion. *Nucl. Eng. Des.*, 2013, vol. 264, pp. 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.017>
- [19] Manickam L., Qiang G., Ma W., et al. An experimental study on the intense heat transfer and phase change during melt and water interactions. *Exp. Heat Transf.*, 2019, vol. 32, iss. 3, pp. 251–266. DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2018.1505786>
- [20] Вавилов С.Н., Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А. Паровой взрыв: экспериментальные наблюдения. *Теплоэнергетика*, 2022, № 1, с. 78–84. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040363621110072>
- [21] Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А. и др. Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду. *ТВТ*, 2005, т. 43, № 1, с. 100–114.

Васильев Николай Викторович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории теплообмена в энергетических установках ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Вавилов Сергей Николаевич — научный сотрудник лаборатории теплообмена в энергетических установках ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Зейгарник Юрий Альбертович — д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории теплообмена в энергетических установках ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А. Экспериментальное исследование распространения парового взрыва после самопроизвольного триггеринга на расплавленных каплях соли и олова. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2023, № 6 (111), с. 25–38.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-6-25-38>

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF STEAM EXPLOSION
PROPAGATION AFTER ITS SPONTANEOUS TRIGGERING
ON THE SALT AND TIN MOLTEN DROPLETS**

N.V. Vasil'ev

nikvikvas@mail.ru

S.N. Vavilov

sergeynv@mail.ru

Yu.A. Zeigarnik

zeigar@oivtran.ru

**Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation**

Abstract

The vapor explosion (explosive boiling of the low-boiling liquid with a highly heated melt immersed in it) could occur during accidents in certain existing and promising technological processes, including nuclear power plants, metallurgy and cellulose production. Experimental research results are provided of the least studied stages of the vapor explosion process, i.e., triggering (initiation) and fine fragmentation of the melt. NaCl sodium chlorate and Sn tin were used as the melt materials. Introduction of the sodium chlorate drops is due to the practically “guaranteed” spontaneous triggering, which made it possible to bring experimental conditions closer to the real ones in comparison with the external (forced) triggering used in most studies. It was shown that in interaction of several sodium chlorate drops with water, spontaneous triggering (micro-explosive boiling of the cold liquid) on a single drop caused “chain reaction” of the micro-vapor explosions on the neighboring drops. The similar “chain reaction” of micro explosions also occurred from the drops of sodium chlorate to the drops of tin (probability of spontaneous triggering of the tin molten drops in water is very low). Due to transience (tens to hundreds of microseconds) of the processes being studied, high-speed video recording with a frame rate of up to 180 kHz and exposure time of up to 2 microseconds was used as the main research tool

Keywords

Vapor explosion, subcooled water, molten drops, sodium chlorate, tin, spontaneous triggering, high-speed video recording

Received 15.03.2023

Accepted 02.05.2023

© Author(s), 2023

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (State Assignment no. 075-01129-23-00)

REFERENCES

- [1] Fletcher D.F., Theofanous T.G. Heat transfer and fluid dynamic aspects of explosive melt-water interactions. *Adv. Heat Transf.*, 1997, vol. 29, pp. 129–213. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70185-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70185-0)
- [2] Meignen R., Raverdy B., Buck M., et al. Status of steam explosion understanding and modelling. *Ann. Nucl. Energy*, 2014, vol. 74, pp. 125–133. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.008>
- [3] Shen P., Zhou W., Cassiaut-Louis N., et al. Corium behavior and steam explosion risks: a review of experiments. *Ann. Nucl. Energy*, 2018, vol. 121, pp. 162–176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.07.029>
- [4] Simons A., Bellemans I., Crivits T., et al. Heat transfer considerations on the spontaneous triggering of vapor explosions — a review. *Metals*, 2021, vol. 11, iss. 1, art. 55. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11010055>
- [5] Melikhov V.I., Melikhov O.I., Yakush S.E. Thermal interaction of high-temperature melts with liquids. *High. Temp.*, 2022, vol. 60, no. 2, pp. 252–285. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X22020274>
- [6] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. The adaptive composite block-structured grid calculation of the gas-dynamic characteristics of an aircraft moving in a gas environment. *Mathematics*, 2022, vol. 10, iss. 12, art. 2130. DOI: <https://doi.org/10.3390/math10122130>
- [7] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Varaksin A.Yu. Calculation of heat transfer and drag coefficients for aircraft geometric models. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, iss. 21, art. 11011. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122111011>
- [8] Kuzenov V.V., Ryzhkov S.V., Starostin A.V. Development of a mathematical model and the numerical solution method in a combined impact scheme for MIF target. *Rus. J. Nonlin. Dyn.*, 2020, vol. 16, no. 2, pp. 325–341. DOI: <https://doi.org/10.20537/nd200207>
- [9] Ivochkin Yu.P., Zeigarnik Yu.A., Kubrikov K.G. Mechanisms governing fine fragmentation of hot melt immersed in cold water. *Therm. Eng.*, 2018, vol. 65, no. 7, pp. 462–472. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601518070029>
- [10] Kim B., Corradini M.L. Modeling of small-scale single droplet fuel/coolant interactions. *Nucl. Sci. Eng.*, 1988, vol. 98, iss. 1, pp. 16–28. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE88-A23522>
- [11] Cronenberg A.W., Chawla T.C., Fauske H.K. A thermal stress mechanism for the fragmentation of molten UO₂ upon contact with sodium coolant. *Nucl. Eng. Des.*, 1974, vol. 30, iss. 3, pp. 433–443. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(74\)90228-3](https://doi.org/10.1016/0029-5493(74)90228-3)
- [12] Kazimi M.S., Autruffe M.I. On the mechanism for hydrodynamic fragmentation. *Trans. Am. Nucl. Soc.*, 1978, vol. 30, pp. 366–367.
- [13] Dullforce T.E., Buchanan D.J., Perckover R.S. Self-triggering of small-scale fuel-coolant interactions: I. Experiments. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1974, vol. 9, no. 9, pp. 1295–1303. DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/9/9/006>

- [14] Wang C., Wang C., Chen B., et al. Fragmentation regimes during the thermal interaction between molten tin droplet and cooling water. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2021, vol. 166, art. 120782. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120782>
- [15] 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, vol. 29, iss. 3, pp. 351–361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.05.013>
- [16] Zyszkowski W. Study of the thermal explosion phenomenon in molten copper — water system. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 1976, vol. 19, iss. 8, pp. 849–868. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(76\)90197-6](https://doi.org/10.1016/0017-9310(76)90197-6)
- [17] Song J., Wang C., Chen B., et al. Phenomena and mechanism of molten copper column interaction with water. *Acta Mech.*, 2020, vol. 231, no. 6, pp. 2369–2380. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00707-020-02667-x>
- [18] Hansson R.C., Dinh T.N., Manickam L.T. A study of the effect of binary oxide materials in a single droplet vapor explosion. *Nucl. Eng. Des.*, 2013, vol. 264, pp. 168–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2013.02.017>
- [19] Manickam L., Qiang G., Ma W., et al. An experimental study on the intense heat transfer and phase change during melt and water interactions. *Exp. Heat Transf.*, 2019, vol. 32, iss. 3, pp. 251–266. DOI: <https://doi.org/10.1080/08916152.2018.1505786>
- [20] Vavilov S.N., Vasil'ev N.V., Zeigarnik Yu.A. Vapor explosion: experimental observations. *Therm. Eng.*, 2022, vol. 69, no. 1, pp. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601521110070>
- [21] Grigor'ev V.S., Zhilin V.G., Zeigarnik Yu.A., et al. The behavior of a vapor film on a highly superheated surface immersed in subcooled water. *High Temp.*, 2005, vol. 43, no. 1, pp. 103–118. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10740-005-0050-3>

Vasil'ev N.V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Researcher, Laboratory of Heat Transfer in Power Plants, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Vavilov S.N. — Researcher, Laboratory of Heat Transfer in Power Plants, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Zeigarnik Yu.A. — Dr. Sc. (Eng.), Chief Researcher, Laboratory of Heat Transfer in Power Plants, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Vasil'ev N.V., Vavilov S.N., Zeigarnik Yu.A. Experimental research of steam explosion propagation after its spontaneous triggering on the salt and tin molten droplets. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2023, no. 6 (111), pp. 25–38 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-6-25-38>