

Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 9. С. 420–427
Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 9, pp. 420–427

Научная статья
УДК 544.015.4
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=183976>
EDN: <https://www.elibrary.ru/PFJNQF>

Экспериментальное исследование возможности возникновения парового взрыва на начальной стадии дробления струи расплава

Н.В. Васильев¹✉, С.Н. Вавилов², Е.А. Лиджиев³

^{1,2,3}*Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Российская Федерация*
¹nikvikvas@mail.ru✉

Аннотация. При попадании в холодную воду расплава с высокой температурой при определенных условиях возможны процессы ее вскипания взрывного характера, сопровождаемые фрагментацией расплава, приводящей к росту площади контакта горячего и холодного вещества. Данное явление, получившее название паровой взрыв, способно вызвать разрушительные последствия на объектах атомной, металлургической, целлюлозно-бумажной промышленности. Работа посвящена экспериментальному исследованию с помощью высокоскоростной видеосъемки процесса парового взрыва на дробящейся струе расплавленной соли NaCl в воде. Исследованы режимы распада струи на крупные части, сопровождающиеся отрывом мелких капле-сателлитов с размерами на порядок меньше диаметра струи. Продемонстрирована возможность возникновения парового взрыва вследствие самопроизвольного триггеринга процесса на капле-сателлите на начальном этапе первой стадии грубого дробления и перемешивания струи расплава и его распространения на крупные фрагменты распада струи. Показано, что вероятность развития событий по данному сценарию уменьшается с ростом температуры воды.

Ключевые слова: паровой взрыв, недогретая вода, дробление струи, капля-сателлит, расплавленная соль, самопроизвольный триггеринг, высокоскоростная видеосъемка

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-01062, <https://rscf.ru/project/23-79-01062/>.

Для цитирования. Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Лиджиев Е.А. Экспериментальное исследование возможности возникновения парового взрыва на начальной стадии дробления струи расплава // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 9. С. 420–427. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=183976>

Original article

Experimental study of the possibility of occurrence of a vapor explosion at the initial stage of a melt jet breakup

N.V. Vasil'ev^{1✉}, S.N. Vavilov², E.A. Lidzhiev³^{1,2,3}*Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*¹*nikvikvas@mail.ru✉*

Abstract. When a melt with a high temperature gets into cold water, under certain conditions, processes of its explosive boiling are possible, accompanied by fragmentation of the melt, leading to an increase in the contact area of the hot and cold substances. This phenomenon, called a vapor explosion, can cause destructive consequences at facilities of the nuclear, metallurgical, pulp and paper industries. At the first stage of the vapor explosion process, a hydrodynamic disintegration of a jet of molten substance covered with a vapor film into individual drops and their mixing in the volume of cold liquid (premixing) occurs. The next stage is called triggering and occurs, apparently, as a result of fluctuations in the thickness of the vapor film up to the possibility of local direct contact of the hot and cold substances. Triggering provokes a fine fragmentation of one of the drops and local sharp vaporization due to an increase in the contact area of water and the melt. Rapid vaporization on one of the droplets provokes a pressure wave propagating in the liquid, which leads to a repetition of similar processes on neighboring droplets and a rapid increase in the volume of the vapor phase.

At the same time, there are regimes of jet breakup, in which disintegration into large fragments is accompanied by the formation of so-called satellite droplets with sizes an order of magnitude smaller than the diameter of the jet. These satellite droplets are potentially more likely to spontaneously trigger a vapor explosion, which will provoke further spread of the process to neighboring large fragments of the jet breakup. The work is devoted to an experimental study using high-speed video filming of the vapor explosion process on a fragmenting jet of molten salt NaCl in water. The modes of jet breakup into large parts, accompanied by the separation of small satellite drops with sizes an order of magnitude smaller than the jet diameter, are studied. The possibility of a vapor explosion due to spontaneous triggering of the process on the satellite droplet at the initial stage of the first stage of rough fragmentation and mixing of the melt jet and its spread to large fragments of jet breakup is demonstrated. It is shown that the probability of events developing according to this scenario decreases with increasing water temperature.

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

Funding. The study was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (grant № 23-79-01062), <https://rscf.ru/project/23-79-01062/>.

For citation. Vasil'ev N.V., Vavilov S.N., Lidzhiev E.A. Experimental study of the possibility of occurrence of a vapor explosion at the initial stage of a melt jet breakup. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 9, pp. 420–427. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=183976>

Введение

Актуальность исследования связана с проблемой возникновения парового взрыва при аварийных ситуациях в различных отраслях промышленности, в том числе в атомной энергетике при

расплавлении активной зоны реактора с образованием высокотемпературного кориума и его последующем взаимодействии с водой (по иностранной терминологии FCI – fuel-coolant interaction). Подробное описание этой проблемы, при-

менительно в основном к вопросам безопасности атомных электростанций, можно найти в работах [1–3]. Современные сведения по этой проблеме представлены в обзорах [4–6]. Результаты исследований паровых взрывов применительно к металлургии, описаны в [7]. Обзор работ по исследованию особенностей теплопередачи при паровых взрывах представлен в [8]. Помимо атомной энергетики и металлургии, возникновение парового взрыва возможно в целлюлозно-бумажной промышленности [9, 10]. В настоящее время рассматриваются некоторые возможности практического применения парового взрыва, обеспечивающего очень быстрое «взрывное» охлаждение расплавов в целях получения аморфных металлов [11].

На первой стадии развития процесса парового взрыва происходит гидродинамический распад струи расплавленного вещества, покрытой паровой пленкой, на отдельные капли и их перемешивание в объеме холодной жидкости (премиксинг). Следующая стадия носит название триггеринга и наступает, по всей видимости, вследствие колебаний толщины паровой пленки вплоть до возможности локального прямого контакта горячего и холодного веществ [12, 13]. Триггеринг провоцирует тонкую фрагментацию одной из капель и локальное резкое парообразование вследствие увеличения площади контакта воды и расплава при этом. Механизмы, приводящие к фрагментации капли, до конца не изучены. Из наиболее распространенных в научной литературе гипотез (моделей) следует отметить: термомеханическую [14], кавитационно-акустическую [15] и гидродинамические модели проникающих [16] и ударных струй [17]. Резкое парообразование на одной из капель провоцирует распространяющуюся в жидкости волну давления, что приводит к повторению аналогичных процессов на соседних каплях и быстрому росту объема паровой фазы. В наших предшествующих работах [18, 19] с помощью высокоскоростной видеосъемки было впервые экспериментально показано такое распространение парового взрыва между каплями расплава.

При изучении парового взрыва обычно не рассматривается возможность его возникновения на начальной стадии премиксинга. В то же время, например, в работе [20] были показаны режимы дробления струи в системе двух не-

смешивающихся жидкостей при низких числах Вебера ($1 < We < 10$), при которых распад на крупные фрагменты сопровождается образованием, так называемых, капля-сателлитов с размерами на порядок меньше диаметра струи (рис. 1). Ввиду малых размеров таких капля-сателлитов и колебаний покрывающей их тонкой паровой пленки, которые могут быть спровоцированы в момент отрыва от струи, на них становится вероятным триггеринг парового взрыва. При достаточной интенсивности парообразования на капля-сателлите процесс способен распространиться на соседние крупные фрагменты распада струи.

Исходя из вышесказанного целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование с помощью высокоскоростной видеосъемки возможности возникновения самопроизвольного (без использования искусственного триггеринга, зачастую применяемого в работах такого типа) парового взрыва на первой стадии дробления струи расплава.

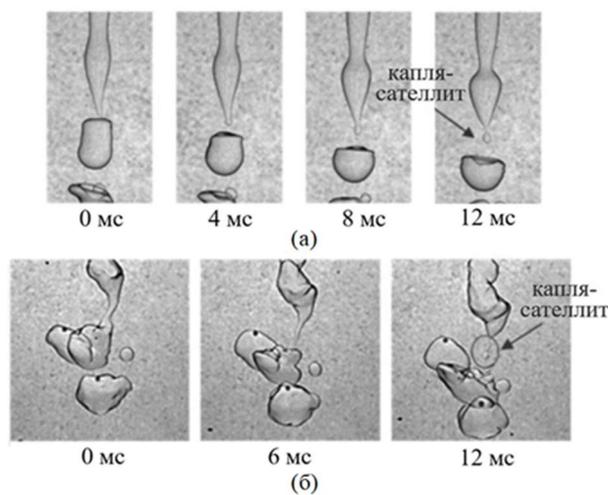


Рис. 1. Режимы распада струи с отрывом капля-сателлитов: (а) – варикозный (varicose) распад; (б) – извилистый (sinuous) распад, [20]

Материалы и методы

Для проведения исследования использовалась экспериментальная установка, основными элементами которой являлись тигель для расплавления и нагрева до требуемой температуры материала струи и емкость с дистиллированной водой. Подробное описание установки представлено в [21, 22]. Для нагрева расплава до высоких температур и минимизации степени его

окисления тигель изготавливался из графита. Он представлял собой полый цилиндр диаметром 24 мм и высотой 35 мм (рис. 2). Внутренняя несквозная полость тигля имела диаметр 14 мм с нижним отверстием диаметром 4 мм, которое до момента подачи расплава в емкость с водой было закрыто цилиндрическим стержнем из графита с коническим наконечником. Подъем стержня осуществлялся с помощью специального линейно подвижного электрического механизма по нажатию кнопки. Для нагрева тигля использовался высокочастотный индуктор ВЧ-15АВ с максимальной мощностью 15 кВт.

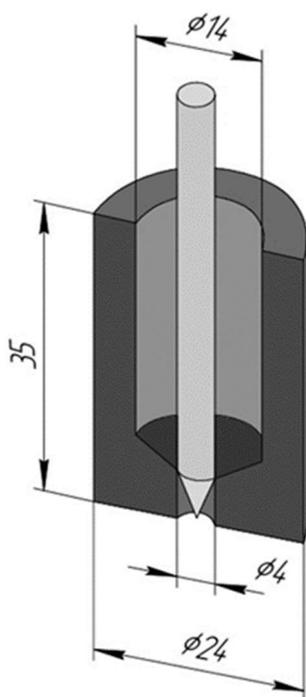


Рис. 2. Схема тигля для нагрева материала расплава в разрезе с цилиндрическим стержнем

Вода заливалась в емкость из нержавеющей стали с прямоугольным сечением 530×250 мм до уровня 150 мм (то есть, примерно 20 литров). Тигель устанавливался на высоте 70–80 мм от свободной поверхности воды. Хромель-алюмелевые термопары применялись для измерения температуры в теле тигля и воды в емкости. Температура воды в опытах варьировалась в диапазоне $t_w = 20\text{--}50$ °С. Для нагрева воды в емкости использовался электрический нагреватель с мощностью 2 кВт.

Ввиду быстротечности изучаемых процессов основным инструментом исследования являлась

высокоскоростная видеосъемка с частотой кадров 77 кГц (длительность промежутка между кадрами – 13 мкс) и временем экспозиции до 2 мкс на камеру Phantom VEO 310L. Съемка производилась через специальное прозрачное окно из стекла, приклеенное к боковой стенке емкости с водой. Для подсветки использовались мощные светодиодные фонари с яркостью 1000 люмен.

В качестве материала расплава применялась соль NaCl, использование которой показало ранее хорошую реализуемость и повторяемость самопроизвольного парового взрыва на отдельных каплях [23]. Кроме того, например, в работе [10] применительно к одному из этапов производства бумаги было показано, что с ростом содержания NaCl увеличивается вероятность парового взрыва в системе расплава смеси $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{--NaCl}$ с водой (рис. 3). Используемая в опытах масса NaCl для расплавления в тигле составляла 3,5–5 г, температура нагрева варьировалась в диапазоне $t_{\text{NaCl}} = 1000\text{--}1100$ °С (температура плавления NaCl составляет 801 °С).

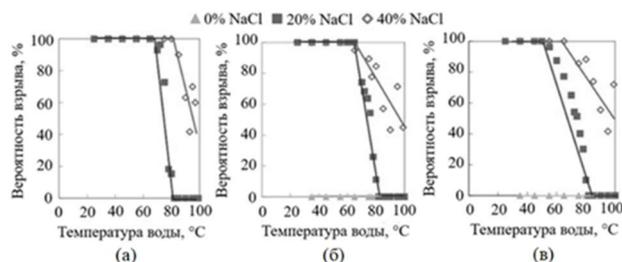


Рис. 3. Увеличение вероятности парового взрыва с ростом содержания NaCl в расплаве смеси $\text{Na}_2\text{CO}_3\text{--NaCl}$. Температура расплава: (а) – 800°С; (б) – 900°С; (в) – 1000°С, [10]

Результаты исследования и обсуждение

Иллюстрация типичного развития процесса в проведенных экспериментах при низкой температуре воды $t_w = 20\text{--}25$ °С представлено на рис. 4. Для эксперимента на рис. 4 число Вебера ($We = \rho v^2 d / \sigma$, где ρ , v , d , σ – соответственно плотность, скорость, диаметр и коэффициент поверхностного натяжения струи расплава) составило $We = 8,4$, что по [20] соответствует типичным режимам распада струи на крупные фрагменты с образованием капель-сателлитов. Физические свойства расплава NaCl (ρ , σ) рассчитывались по формулам из [24]. Скорость движения струи рассчитывалась по кадрам видеосъемки и составила $v = 0,4$ м/с. На кадре

(рис. 4 а) можно видеть момент распада струи расплава NaCl в воде на два крупных фрагмента с формированием капли-сателлита (отмечена белой стрелкой на рис. 4 б). Диаметр капли-сателлита составил $d_{\text{сат}} \approx 0,4$ мм, что соответствует десятой части от диаметра струи (диаметр струи принимался равным диаметру отверстия тигля – 4 мм).

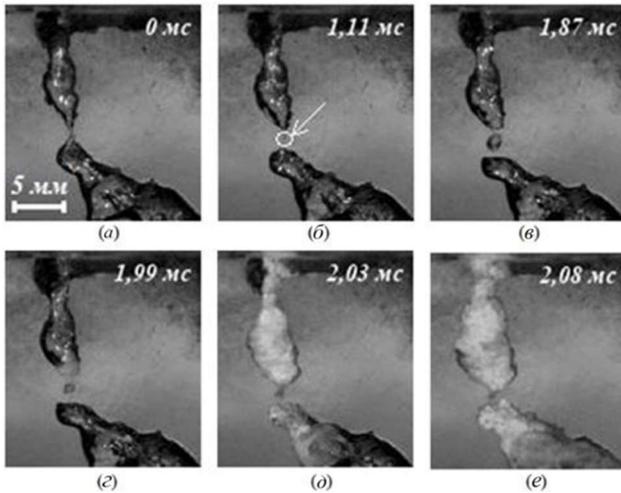


Рис. 4. Распространение парового взрыва при дроблении струи расплавленной соли NaCl в воде (температура воды $t_{\text{в}} = 23$ °С, температура соли в тигле $t_{\text{NaCl}} = 1100$ °С, число Вебера струи $We = 8,4$). Время экспозиции – 4,5 мкс. Белой стрелкой обозначена капля-сателлит, образовавшаяся при распаде струи. Верхняя граница кадров соответствует уровню воды в емкости.

Через небольшой промежуток времени после распада струи (в эксперименте на рис. 4 это время составило примерно 1,65 мс) начинаются колебания диаметра капли-сателлита (рис. 5). Причем амплитуда и скорость увеличения размера с каждым последующим периодом возрастают (от порядка 10 м/с при первом колебании до 30 м/с при третьем), что, по всей видимости, является следствием процесса постепенной фрагментации капли, ведущего к увеличению площади контакта расплава с водой и объема сгенерированного вследствие этого пара. Подобные колебания диаметра капель расплавов наблюдались в экспериментах [17, 25], а в работе [26] с помощью численного моделирования была показана взаимосвязь развития процесса фрагментации капли олова с колебаниями ее диаметра.

На кадре (рис. 4 в) представлен момент достижения каплей-сателлитом максимально-

го диаметра во время третьего цикла колебаний. Затем происходит быстрое уменьшение ее размера вследствие конденсации пара. По-видимому, в этот момент достигается достаточная степень фрагментации для интенсивного парообразования на капле-сателлите (при четвертом по счету увеличении диаметра). Вследствие чего в жидкости распространяется мощный импульс давления. Этого импульса становится достаточно для локального контакта воды с расплавом на верхнем крупном фрагменте распавшейся струи (рис. 4 з), что затем приводит к распространению взрывного парообразования по всей его поверхности. Аналогичные процессы с запозданием в 1–2 кадра наблюдаются на нижнем фрагменте (рис. 4 д–е).

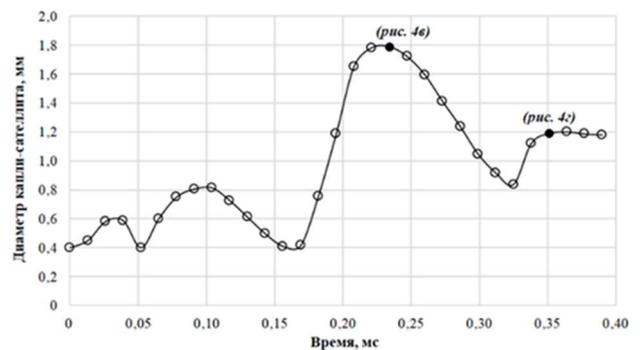


Рис. 5. Колебания диаметра капли-сателлита во времени. Время на горизонтальной оси отсчитывается от момента начала колебаний. Закрашенные точки соответствуют кадрам на рис. 4

При увеличении температуры воды в экспериментах до $t_{\text{в}} = 50$ °С самопроизвольный триггеринг на капле-сателлите не происходил. Что, по-видимому, является следствием увеличения устойчивости паровой пленки, покрывающей каплю расплава, из-за роста ее толщины. Такой эффект наблюдался, например, в работе [27] при проведении экспериментов на нагретых твердых сферах. В результате это приводит к снижению вероятности прямого контакта горячей и холодной жидкостей, и, следовательно, триггеринга процесса парового взрыва на капле расплава.

Типичное развитие процесса в воде с температурой $t_{\text{в}} = 50$ °С в проведенных экспериментах представлено на рис. 6. Колебаний размера капли-сателлита, сформированной в момент распада струи (рис. 6 в), не наблюдалось. По прошествии некоторого времени происходило ее слияние с верхним крупным фрагментом (рис. 6 е).

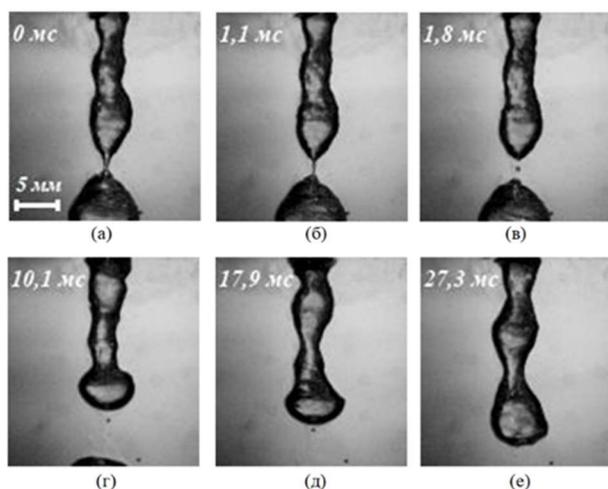


Рис. 6. Распад струи расплава NaCl в воде с образованием капле-сателлита без парового взрыва (температура воды $t_b = 50\text{ }^\circ\text{C}$, температура соли в тигле $t_{\text{NaCl}} = 1050\text{ }^\circ\text{C}$). Время экспозиции – 2,3 мкс. Число Вебера струи ($We = 3,5$). Верхняя граница кадров соответствует уровню воды в емкости

Заключение

Проведено экспериментальное исследование возможности возникновения парового взрыва на начальной стадии дробления струи расплава соли NaCl в воде с использованием высокоскоростной видеосъемки процесса. Исследованы режимы распада струи на крупные фрагменты, сопровождающиеся отрывом мелких капле-сателлитов. Продемонстрирована возможность при определенных температурных условиях ($t_{\text{NaCl}} = 1000\text{--}1100\text{ }^\circ\text{C}$, $t_b = 20\text{--}25\text{ }^\circ\text{C}$) распространения парового взрыва на два крупных фрагмента распада струи вследствие самопроизвольного триггеринга процесса на капле-сателлите. При увеличении температуры воды до $t_b = 50\text{ }^\circ\text{C}$, по-видимому, вследствие увеличения толщины паровой пленки на капле-сателлите развития событий по описанному сценарию не наблюдалось.

Список источников

- Corradini M.L., Kim B.J., Oh M.D. Vapor explosions in light water reactors: A review of theory and modeling // *Progress in Nuclear Energy*. 1988. V. 22. № 1. pp. 1–117. DOI: 10.1016/0149-1970(88)90004-2
- Fletcher D.F., Theofanous T.G. Heat Transfer and Fluid Dynamic Aspects of Explosive Melt–Water Interactions // *Advances in heat transfer*. 1997. V. 29. pp. 129–213. DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70185-0
- Berthoud G. Vapor explosions // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2000. V. 32. № 1. pp. 573–611. DOI: 10.1146/annurev.fluid.32.1.573
- Shen P., Zhou W., Cassiaut-Louis N. et al. Corium behavior and steam explosion risks: A review of experiments // *Annals of Nuclear Energy*. 2018. V. 121. pp. 162–176. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.07.029
- Simons A., Bellemans I., Crivits T. et al. Vapor explosions: modeling and experimental analysis in both small and large-scale setups: a review // *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*. 2021. V. 73. № 10. pp. 3046–3063. DOI: 10.1007/s11837-021-04767-y
- 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.
- Li M., Chen L., Liu Z. et al. Fragmentation and solidification of fuel–coolant interaction of columnar molten iron and water // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2023. V. 148. №. 20. pp. 10897–10906. DOI: 10.1007/s10973-023-12419-3
- Simons A., Bellemans I., Crivits T. et al. Heat transfer considerations on the spontaneous triggering of vapor explosions – a review // *Metals*. 2021. V. 11. № 55. DOI: 10.3390/met11010055
- Jin E., Bussmann M., Tran H. An experimental study of smelt-water interaction in the recovery boiler dissolving tank // *Tappi Journal*. 2015. V. 14. № 6. pp. 385–393. DOI: 10.32964/TJ14.6.385
- Jin E. Smelt droplet-water interaction in the kraft recovery boiler dissolving tank // *diss. ...PhD*. Toronto, 2017. 146 p.
- Ивочкин Ю.П., Бородина Т.И., Казаков А.Н. и др. Экспериментально-расчетное исследование возможности получения аморфных сплавов при взрывной фрагментации горячих капель в низкокипящем охладителе // *Тепловые процессы в технике*. 2020. Т. 12. № 3. С. 136–142. DOI: 10.34759/tpt-2020-12-3-136-142
- Агальцов А.М., Вавилов С.Н., Мариничев Д.В. Волновое движение границы раздела фаз при пленочном кипении жидкостей на вертикальных цилиндрах // *Тепловые процессы в технике*. 2014. Т. 6. № 6. С. 242–245.
- Вавилов С.Н., Жатухин А.В., Киреева А.Н. Исследование контакта холодного теплоносителя с перегретой поверхностью // *Тепловые процессы в технике*. 2011. Т. 3. № 3. С. 118–121.
- Cronenberg A.W., Chawla T.C., Fauske H.K. A thermal stress mechanism for the fragmentation on molten UO₂ upon contact with sodium coolant // *Nuclear Engineering and Design*. 1974. V. 30, № 3. pp. 433–443. DOI: 10.1016/0029-5493(74)90228-3
- Kazimi M.S., Autruffe M.I. On the mechanism for hydrodynamic fragmentation // *Trans. American Nuclear Society*. 1978. V. 27. pp. 321–322.
- Kim B., Corradini M.L. Modeling of small-scale single droplet fuel/coolant interactions // *Nuclear Science and Engineering*. 1988. V. 98, pp. 16–28. DOI: 10.13182/NS E88-A23522

17. Ciccarelli G., Frost D.L. Fragmentation mechanisms based on single drop steam explosion experiments using flash X-ray radiography // *Nuclear engineering and design*. 1994. V. 146. № 1–3. pp. 109–132. DOI: 10.1016/0029-5493(94)90324-7
18. Клименко А.В., Вавилов С.Н., Васильев Н.В. и др. Паровой взрыв: экспериментальные наблюдения стадии спонтанного триггеринга процесса // Доклады академии наук. Физика, технические науки. 2022. Т. 503. С. 13–16. DOI: 10.1134/S1028335822010025
19. Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А. и др. Экспериментальные исследования явлений, происходящих при триггеринге парового взрыва // *Теплоэнергетика*. 2024. № 7. С. 63–71. DOI: 10.56304/S004036362470005X
20. Saito S., Abe Y., Koyama K. Flow transition criteria of a liquid jet into a liquid pool // *Nuclear engineering and design*. 2017. V. 315. pp. 128–143. DOI: 10.1016/j.nuceengdes.2017.02.011
21. Вавилов С.Н., Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А. и др. Спонтанный триггеринг парового взрыва: результаты экспериментальных исследований // *Теплоэнергетика*. 2022. № 7. С. 15–22. DOI: 10.1134/S0040363622070074
22. Васильев Н.В., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А. Визуализация процессов, происходящих при самопроизвольном триггеринге парового взрыва // *Научная визуализация*. 2023. Т. 15. № 2. С. 38–44. DOI: 10.26583/sv.15.2.04
23. Вавилов С.Н., Васильев Н.В., Зейгарник Ю.А. Паровой взрыв: экспериментальные наблюдения // *Теплоэнергетика*. 2022. № 1. С. 78–84. DOI: 10.1134/S0040363621110072
24. Катышев С.Ф., Десятник В.Н. Плотность и поверхностное натяжение расплавов системы NaF–NaCl–ZrF₄ // *Атомная энергия*. 1998. Т. 84. № 1. С. 61–64.
25. Manickam L., Qiang G., Ma W. et al. An experimental study on the intense heat transfer and phase change during melt and water interactions // *Experimental Heat Transfer*. 2019. V. 32. № 3. pp. 251–266. DOI: 10.1080/08916152.2018.1505786
26. Yakush S.E., Sivakov N.S. Numerical modeling of high-temperature melt droplet interaction with water // *Annals of Nuclear Energy*. 2023. V. 185. DOI: 10.1016/j.anucene.2023.109718
27. Ивочкин Ю.П., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А. и др. К вопросу об отсутствии фрагментации горячих капель при малых недогревах охладителя // *Теплофизика и аэромеханика*. 2012. Т. 19. № 4. С. 475–481. DOI: 10.1134/S0869864312030080
- Advances in heat transfer. 1997;29:129–213. DOI: 10.1016/S0065-2717(08)70185-0
3. Berthoud G. *Vapor explosions*. Annual Review of Fluid Mechanics. 2000;32(1):573–611. DOI: 10.1146/annurev.fluid.32.1.573
4. Shen P, Zhou W, Cassiaut-Louis N et al. *Corium behavior and steam explosion risks: A review of experiments*. Annals of Nuclear Energy. 2018;121:162–176. DOI: 10.1016/j.anucene.2018.07.029
5. Simons A, Bellemans I, Crivits T et al. *Vapor explosions: modeling and experimental analysis in both small- and large-scale setups: a review*. The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society. 2021;73(10):3046–3063. DOI: 10.1007/s11837-021-04767-y
6. Melikhov VI, Melikhov OI, Yakush SE. *Thermal Interaction of High-Temperature Melts with Liquids*. High Temperature. 2022;60(2):252–285. DOI: 10.1134/S0018151X22020274 (In Russ.).
7. Li M, Chen L, Liu Z et al. *Fragmentation and solidification of fuel-coolant interaction of columnar molten iron and water*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2023;148(20):10897–10906. DOI: 10.1007/s10973-023-12419-3
8. Simons A, Bellemans I, Crivits T et al. *Heat transfer considerations on the spontaneous triggering of vapor explosions – a review*. Metals. 2021;11(55). DOI: 10.3390/met11010055
9. Jin E, Bussmann M, Tran H. *An experimental study of smelt-water interaction in the recovery boiler dissolving tank*. Tappi Journal. 2015;14(6):385–393. DOI: 10.32964/TJ14.6.385
10. Jin E. *Smelt droplet-water interaction in the kraft recovery boiler dissolving tank*. [PhD]. [Toronto]: University of Toronto; 2017.
11. Ivochkin YuP, Borodina TI, Kazakov AN et al. *Experimental and computational study of the possibility of obtaining amorphous alloys during explosive fragmentation of hot droplets in a low-boiling cooler*. Thermal processes in engineering. 2020;12(3):136–142. DOI: 10.34759/tpt-2020-12-3-136-142 (In Russ.).
12. Agal'tsov AM, Vavilov SN, Marinichev DV. *Wave motion of the phase interface during film boiling of liquids on vertical cylinders*. Thermal processes in engineering. 2014;6(6):242–245. (In Russ.).
13. Vavilov SN, Zhatukhin AV, Kireeva AN. *Study of the contact of a cold coolant with a superheated surface*. Thermal processes in engineering. 2011;3(3):118–121. (In Russ.).
14. Cronenberg AW, Chawla TC, Fauske HK. *A thermal stress mechanism for the fragmentation on molten UO₂ upon contact with sodium coolant*. Nuclear Engineering and Design. 1974;30(3):433–443. DOI: 10.1016/0029-5493(74)90228-3
15. Kazimi MS, Atruffe MI. *On the mechanism for hydrodynamic fragmentation*. Trans. American Nuclear Society. 1978;27:321–322.

References

1. Corradini ML, Kim BJ, Oh MD. *Vapor explosions in light water reactors: A review of theory and modeling*. Progress in Nuclear Energy. 1988;22(1):1–117. DOI: 10.1016/0149-1970(88)90004-2
2. Fletcher DF, Theofanous TG. *Heat Transfer and Fluid Dynamic Aspects of Explosive Melt–Water Interactions*.

16. Kim B, Corradini ML. *Modeling of small-scale single droplet fuel/coolant interactions*. Nuclear Science and Engineering. 1988;98:16–28. DOI: 10.13182/NSE88-A23522
17. Ciccarelli G, Frost DL. *Fragmentation mechanisms based on single drop steam explosion experiments using flash X-ray radiography*. Nuclear engineering and design. 1994;146(1–3):109–132. DOI: 10.1016/0029-5493(94)90324-7
18. Klimenko AV, Vavilov SN, Vasil'ev NV et al. *Vapor explosions: experimental observations of the spontaneous triggering phase*. Doklady physics. 2022;67(3): 67–69. DOI: 10.1134/S1028335822010025 (In Russ.).
19. Vasil'ev NV, Vavilov SN, Zeigarnik YuA et al. *Experimental studies of phenomena occurring during vapor explosion triggering*. Thermal Engineering. 2024;71(7): 600–607. DOI: 10.1134/S0040601524700113 (In Russ.).
20. Saito S, Abe Y, Koyama K. *Flow transition criteria of a liquid jet into a liquid pool*. Nuclear engineering and design. 2017;315:128–143. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2017.02.011
21. Vavilov SN, Vasil'ev NV, Zeigarnik YuA et al. *Spontaneous Triggering of Vapor Explosion: Results of Experimental Studies*. Thermal Engineering. 2022;69(7): 484–489. DOI: 10.1134/S0040601522070072 (In Russ.).
22. Vasil'ev NV, Vavilov SN, Zeigarnik YuA. *Visualization of the Processes Occurring during Spontaneous Triggering of a Vapor Explosion*. Scientific Visualization. 2023; 15(2):38–44. DOI: 10.26583/sv.15.2.04 (In Russ.).
23. Vavilov SN, Vasil'ev NV, Zeigarnik YuA. *Vapor Explosion: Experimental Observations*. Thermal Engineering. 2022;69(1):66–71. DOI: 10.1134/S0040601521110070 (In Russ.).
24. Katyshev SF, Desyatnik VN. *Density and surface tension of melts of the NaF–NaCl–ZrF₄ system*. Atomic Energy. 1998;84(1):61–64. (In Russ.).
25. Manickam L, Qiang G, Ma W et al. *An experimental study on the intense heat transfer and phase change during melt and water interactions*. Experimental Heat Transfer. 2019;32(3):251–266. DOI: 10.1080/08916152.2018.1505786
26. Yakush SE, Sivakov NS. *Numerical modeling of high-temperature melt droplet interaction with water*. Annals of Nuclear Energy. 2023;185. DOI: 10.1016/j.anucene.2023.109718
27. Ivochkin YuP, Vavilov SN, Zeigarnik YuA et al. *About lack of fragmentation for hot droplets at low sub-cooling of coolant*. Thermophysics and Aeromechanics. 2012;19: 429–434. DOI: 10.1134/S0869864312030080 (In Russ.).