

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ,
ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ТРИГГЕРИНГЕ ПАРОВОГО ВЗРЫВА¹

© 2024 г. Н. В. Васильев^{a, b, *}, С. Н. Вавилов^a, Ю. А. Зейгарник^a, Е. А. Лиджиев^{a, b}

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

^bМосковский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,

2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, Москва, 105005 Россия

*e-mail: nikvikvas@mail.ru

Поступила в редакцию 22.11.2023 г.

После доработки 18.01.2024 г.

Принята к публикации 25.01.2024 г.

Работа посвящена экспериментальному исследованию отдельных слабоизученных стадий триггеринга парового взрыва (опасного разрушительного явления, возникающего при определенных аварийных ситуациях в атомной энергетике, металлургической, целлюлозно-бумажной и других отраслях промышленности). Проведены эксперименты по исследованию распространения фронта детонации после самопроизвольного взрывного вскипания (триггеринга) воды на расплавленной капле соли (NaCl) и стимулированного им парового взрыва на близко расположенных соседних каплях соли и олова. Температура расплавляемых капель в опытах составляла 850–1100°C, температура воды – комнатная (22–24°C). Основным инструментом исследования служила высокоскоростная видеосъемка процесса (частота съемки до 50 кГц, экспозиция до 5 мкс). В целях исследования начальной стадии триггеринга, связанной с локальным контактом охладителя с горячим веществом, проводились эксперименты с использованием высокоскоростных видеосъемок процесса схода паровой пленки на горячей твердой сфере, синхронизированных с фиксацией контакта сфера–охладитель электрическим способом. Приведены кадры мгновенного (precipitous) режима схода паровой пленки длительностью 200–500 мкс и постепенного (progressive) продолжительностью примерно 100 мс на сферах при близких условиях опытов. Показано, что основное влияние на режим схода пленки и парового взрыва на расплавленных каплях олова оказывает импульс давления от парового взрыва на близлежащей капле NaCl. Определены характерные времена процесса триггеринга – десятки-сотни микросекунд. Установлено значение первичного импульса давления в жидкости. Подтверждена определяющая роль в триггеринге тонкой фрагментации сантиметровых капель горячей жидкости первого контакта холодной жидкости с их поверхностью.

Ключевые слова: паровой взрыв, недогретая вода, расплавленная соль, жидкие металлы, олово, твердая сфера, паровая пленка, индикатор электрического контакта, самопроизвольный триггеринг, высокоскоростная видеосъемка

DOI: 10.56304/S004036362470005X

Проблема парового взрыва стала активно изучаться с середины прошлого века в связи с чередой аварий на металлургических предприятиях, унесших жизни людей и повлекших за собой большие экономические потери [1], а также с трагедией на испытательном реакторе SPERT-I в США [2]. В обзорах [3–9] отражена основная часть большого количества исследований, посвященных данной проблеме. Однако до создания целостной теории, описывающей такое сложное и многообразное явление, как паровой взрыв, еще довольно далеко.

Если говорить об экспериментальном изучении этого явления, то имеется два подхода к ис-

следованию парового взрыва – крупномасштабный эксперимент, приближенный к реальным условиям, связанным главным образом с атомной промышленностью, и опыты с одиночными каплями горячего вещества, проводимые с целью выявить детали процесса. В первом случае в качестве горячего вещества использовали материалы, из которых состоит расплав кориума – оксиды урана (UO₂) и циркония (ZrO₂). Масса расплавленного вещества составляла от нескольких килограмм до их десятков, а в отдельных опытах даже свыше сотни килограмм. Основные усилия в этих экспериментах были сосредоточены на получении интегральных характеристик парового взрыва – пиковых давлений и коэффициентов конверсии (отношения высвобождающейся ки-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-01062).

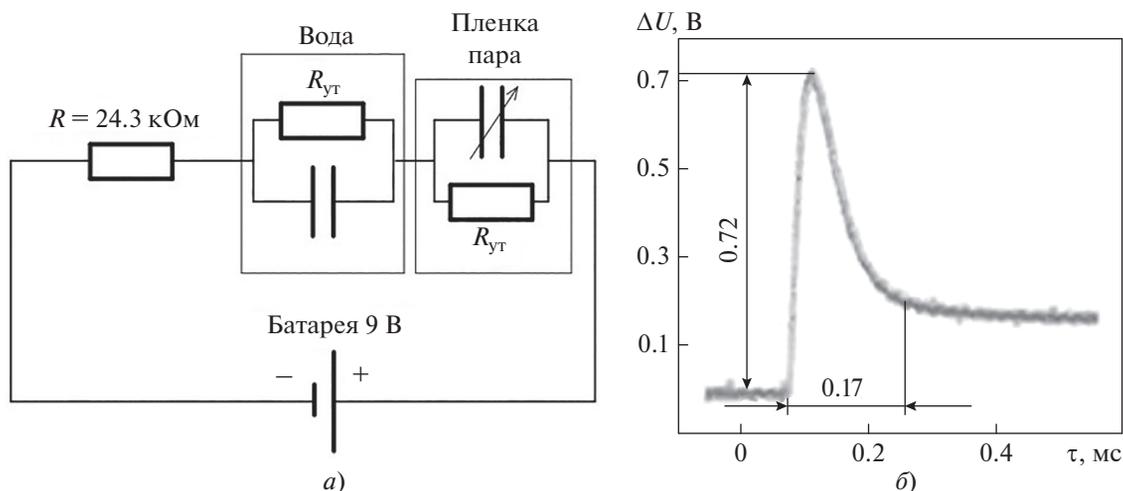


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема измерения прямого контакта жидкости с твердой сферой (а), характерный вид выходного электрического сигнала, генерируемого в момент соприкосновения воды с поверхностью сферы (б) [16]. $R_{ут}$ – сопротивление утечек

нетической энергии к тепловой энергии расплава). Среди таких исследований стоит отметить эксперименты Сандийской национальной лаборатории (США) [10], FARO [11] и KROTOS (Европейский союз) [12], TROI (Южная Корея) [13], ФЭИ им. А.И. Лейпунского (Россия) [14, 15] и др.

Процесс парового взрыва принято разделять на четыре стадии [16]:

начальное грубое перемешивание (премиксинг) – гидродинамическое дробление струи расплава на крупные капли, отделенные паровой пленкой от холодной жидкости, с характерным размером около 1 см;

иницирование (триггеринг) – совокупность процессов, приводящих к взрывной фрагментации капель расплава с образованием ударной волны (амплитудой примерно 1 МПа);

тонкая фрагментация капель расплава, сопровождающаяся резким увеличением площади горячей поверхности и быстрой генерацией большой массы пара, приводящей в условиях ограниченного пространства к распространению мощной ударной волны;

выход продуктов взрыва в окружающее пространство.

В литературе представлено более десятка гипотез, посвященных описанию механизма фрагментации горячей капли [16]. При этом начало стадии триггеринга связывается с прямым контактом охладителя с расплавом, который, по всей видимости, происходит в результате колебаний тонкой паровой пленки в режиме неустойчивого пленочного кипения. С методической точки зрения целесообразно проводить исследования неустойчивого пленочного кипения, заменив расплавленную каплю на зафиксированную после

погружения в охладитель нагретую твердую сферу (полусферу, цилиндр) известных размеров [16–21]. В некоторых подобных работах проводились измерения прямого контакта охладителя с расплавом электрическим способом [16, 18, 19]. На рис. 1, а показана принципиальная электрическая схема устройства, применявшегося ранее в исследованиях ОИВТ РАН [16, 19], а на рис. 1, б – запись типичного сигнала (падение напряжения ΔU во времени τ).

На сегодняшний день достаточно актуальными остаются исследования, направленные на выявление деталей механизма триггеринга и тонкой фрагментации расплава. Наиболее целесообразно проводить такие исследования на одиночных каплях (массой от долей грамма до нескольких граммов) горячего вещества. Среди таких работ следует отметить [22–25] и [26, 27], в которых в качестве горячего вещества использовались олово и медь соответственно. Также недостаточно изучена экспериментально стадия распространения фронта термической детонации от одной капли расплава к последующим, т.е. распространения волны давления в жидкости от места начального триггеринга.

Целью настоящей работы являлось изучение отдельных слабоизученных стадий триггеринга парового взрыва. Экспериментальные исследования распространения фронта парового взрыва проводили с помощью высокоскоростной видеосъемки самопроизвольного взрывного вскипания воды на расплавленной капле NaCl и стимулированного им схода паровой пленки с близко расположенных соседних капель олова. В целях исследования начальной стадии триггеринга, связанной с локальным контактом охладителя с горячим ве-

ществом, проводили эксперименты с использованием высокоскоростных видеосъемок процесса схода паровой пленки на горячей твердой сфере, синхронизированных с фиксацией контакта сфера – охладитель электрическим способом.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2, а. При изучении процесса передачи возбуждающего импульса с одной капли на другую две одиночные капли расплавленного вещества поступали в емкость размерами 530 × 250 × 230 мм с дистиллированной водой 1 из устьев графитового тигля 2. Тигель в форме прямоугольного параллелепипеда высотой 35, шириной 33 и толщиной 23 мм располагался на высоте 60–80 мм над свободной поверхностью воды. В тигле были высверлены две цилиндрические полости, каждая диаметром 10 мм, на глубину 30 мм с расстоянием между осями 13 мм. В нижней части полостей располагались сквозные отверстия диаметром 4 мм, которые до момента подачи расплавленных капель были закрыты графитовыми цилиндрическими стержнями 4 с коническими торцами. Для подъема и опускания стержней применялось линейное перемещающее устройство 5, работающее от источника постоянного тока. Масса соли и (или) олова, загружаемых в каждое устье тигля, составляла 1–2 г. Для измерения температуры воды и расплавленного вещества в

тигле использовали хромель-алюмелевые термодатчики.

Наблюдения за эволюцией паровой пленки на твердой сфере, нагретой выше температуры предельного перегрева воды, после самопроизвольного парового взрыва на близлежащей капле NaCl осуществляли в следующей последовательности. Сначала в воду погружали нагретую твердую сферу из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, на поверхности которой устанавливалось пленочное кипение, затем через некоторое время (1.0–1.5 с) в воду подавали каплю расплавленной соли, после чего проводили видеосъемку процесса. Нагрев сферы и плавление соли, так же как и в случае двух капель, осуществляли одновременно в двухполостном графитовом тигле несколько измененной конструкции (рис. 2, б). Соль плавилась, как и ранее, в полости диаметром 10 мм с нижним выходным отверстием 4 мм, а нагрев и подача сферы диаметром 12 мм, укрепленной с помощью резьбового соединения на специальной цилиндрической державке диаметром 8 мм, происходили через сквозное отверстие диаметром 14 мм в тигле.

С помощью камер Phantom Miro 110 и Phantom VEO 410s производили высокоскоростную видеосъемку процесса с частотой до 50 кГц и экспозицией до 5 мкс, для подсветки использовали мощные светодиодные фонари.

Эксперименты по исследованию контакта жидкости с горячей поверхностью проводили на рабо-

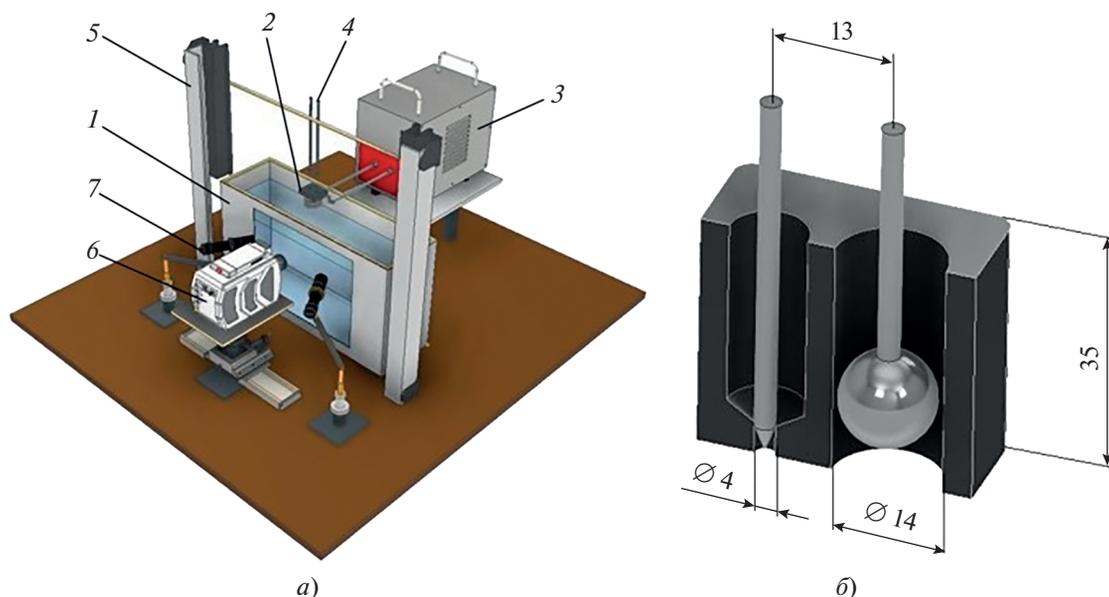


Рис. 2. Схемы экспериментальной установки (а) и двухполостного графитового тигля для одновременного нагрева твердых сфер и расплавления капель NaCl (б).
 1 – емкость с водой; 2 – графитовый тигель; 3 – высокочастотный индуктор; 4 – графитовые стержни; 5 – вертикальное линейное перемещающее устройство; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – фонари подсветки

чих участках в виде нагретых твердых сфер диаметром 18 мм из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, укрепленных на цилиндрических державках и погруженных в воду на глубину, равную радиусу сферы. После погружения в воду на сфере образовывалась стабильная паровая пленка. Определение контакта жидкости со сферой осуществлялось электрическим способом путем фиксации замыкания цепи (повышения напряжения на образцовом сопротивлении), в которой сфера выступала в качестве одного электрода, другой же электрод помещался в воду. Методика фиксации момента контакта жидкости и горячей сферы была схожа с таковой в работах ОИВТ РАН [16, 19].

Запись изменения напряжения в цепи во времени осуществлялась системой сбора данных (ССД) по каналу модуля NI 9215, подключенного к шасси NI Compact DAQ-9178 фирмы National Instruments, с последующим выводом данных на персональный компьютер. Синхронизация проводилась с помощью короткого импульса, испускаемого генератором марки Г5-63.

Во всех опытах для нагрева тигля до 850–1100°C для плавления в нем соли и олова и нагрева сфер использовали высокочастотный индукционный нагреватель ВЧ-15АВ (индуктор), имеющий водяное охлаждение и тепловую изоляцию.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На предыдущем этапе работы экспериментально было продемонстрировано распространение микровзрыва (элементарного акта процесса совокупного триггеринга парового взрыва) от одной капли соли NaCl к соседним [28, 29]. На капле расплава NaCl самопроизвольный триггеринг (без внешнего импульса давления) реализовывался в опытах практически со 100%-ной вероятностью в воде температурой 15–70°C [30]. Аналогичные результаты были получены в работе [31] при взаимодействии с водой расплавленных капель смеси 80% Na₂CO₃ и 20% NaCl. Скорее всего, основной причиной такой высокой вероятности взрыва на каплях NaCl, наряду с низкой, по сравнению с жидкими металлами, вязкостью является хорошая растворимость соли в воде, при которой наиболее эффективно взаимное проникновение частиц растворителя и растворяемого вещества.

Чтобы достичь наилучшего соответствия большинству реальных условий возникновения парового взрыва, практические эксперименты целесообразнее проводить на каплях жидких металлов. В качестве расплавленного металла в работе использовали олово Sn — одно из наиболее часто применяемых в такого рода исследованиях веществ. Однако предыдущие опыты на каплях олова в условиях без внешнего триггеринга парового взрыва показали низкую реализуемость

этого процесса. Поэтому для исследования передачи импульса, возбуждающего триггеринг на каплях Sn, использовали практически “гарантированный” самопроизвольный паровой взрыв на соседней капле NaCl, что позволяло приблизить условия эксперимента к тем, что имеют место на практике. Реализация предложенного метода в эксперименте осуществлялась посредством одновременной генерации капель расплава соли и олова в соседних отверстиях двухполостного тигля.

На рис. 3 представлены кадры видеосъемки распространения волны детонации, стимулированной паровым взрывом на расплавленной капле соли, на соседние капли соли и олова при температуре воды $t_b = 23^\circ\text{C}$, температуре тигля $t_{\text{NaCl}} = t_{\text{Sn}} = 1100^\circ\text{C}$. На кадре, показанном на рис. 3, а, приведена нумерация трех сформировавшихся после попадания в воду капель расплава NaCl и двух капель олова Sn. На рис. 3, б изображен момент парового взрыва на первой капле соли NaCl-1, на рис. 3, в — момент распространения волны детонации на близлежащую вторую каплю соли NaCl-2, на рис. 3, г, д — дальнейшее распространение процесса на третью каплю NaCl-3 и первую каплю олова Sn-1. На последнем кадре (см. рис. 3, е) волна детонации достигает второй капли олова Sn-2, дальше всех расположенной от первой капли NaCl.

Ожидалось, что картины триггеринга (передачи побуждающего к сходу паровой пленки импульса) при реализации этого процесса между каплями и от капли к твердой сфере будут достаточно схожими. В целом, так оно и оказалось.

На рис. 4 представлены кадры видеосъемки схода паровой пленки с нагретой твердой сферы после самопроизвольного парового взрыва на близко расположенной крупной капле NaCl. Место триггеринга на капле соли показано черной стрелкой, белыми стрелками отмечены границы сходящей со сферы паровой пленки. Процесс полного схода пленки с поверхности сферы занял 250–300 мкс (см. рис. 4, в–е).

На рис. 5 для сравнения приведены видеокадры самопроизвольного схода паровой пленки со сферы при близких начальных условиях. Длительность схода в этом случае составила сотни миллисекунд (т.е. на три порядка больше), что говорит об определяющем влиянии на процесс схода пленки импульса давления от парового взрыва капли NaCl. Белыми стрелками отмечены границы сходящей со сферы паровой пленки.

В работе [17] наблюдались аналогичные по длительности два режима схода паровой пленки — мгновенный (precipitous) длительностью 200–500 мкс и постепенный (progressive) длительностью примерно 100 мс. Предположение о причинах наступления мгновенного режима свя-

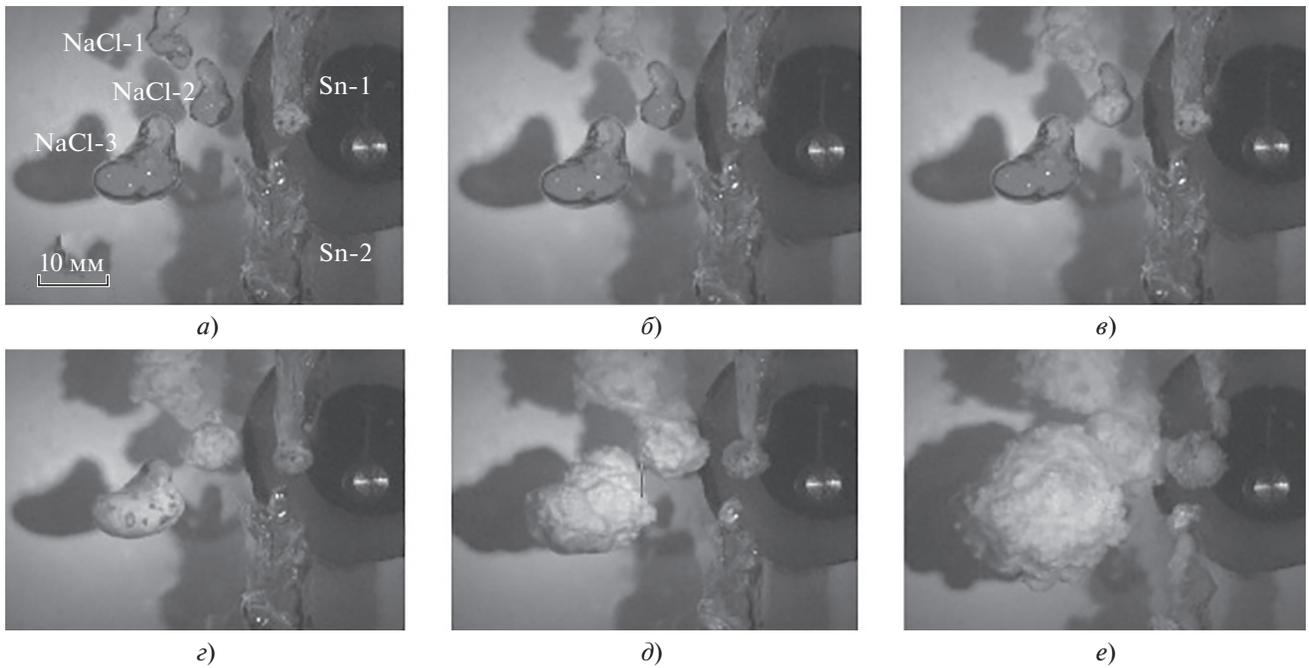


Рис. 3. Волна детонации парового взрыва, распространяющаяся между каплями соли и олова. Экспозиция – 10 мкс. τ , мкс: *a* – 0; *b* – 33; *c* – 66; *z* – 132; *d* – 231; *e* – 396

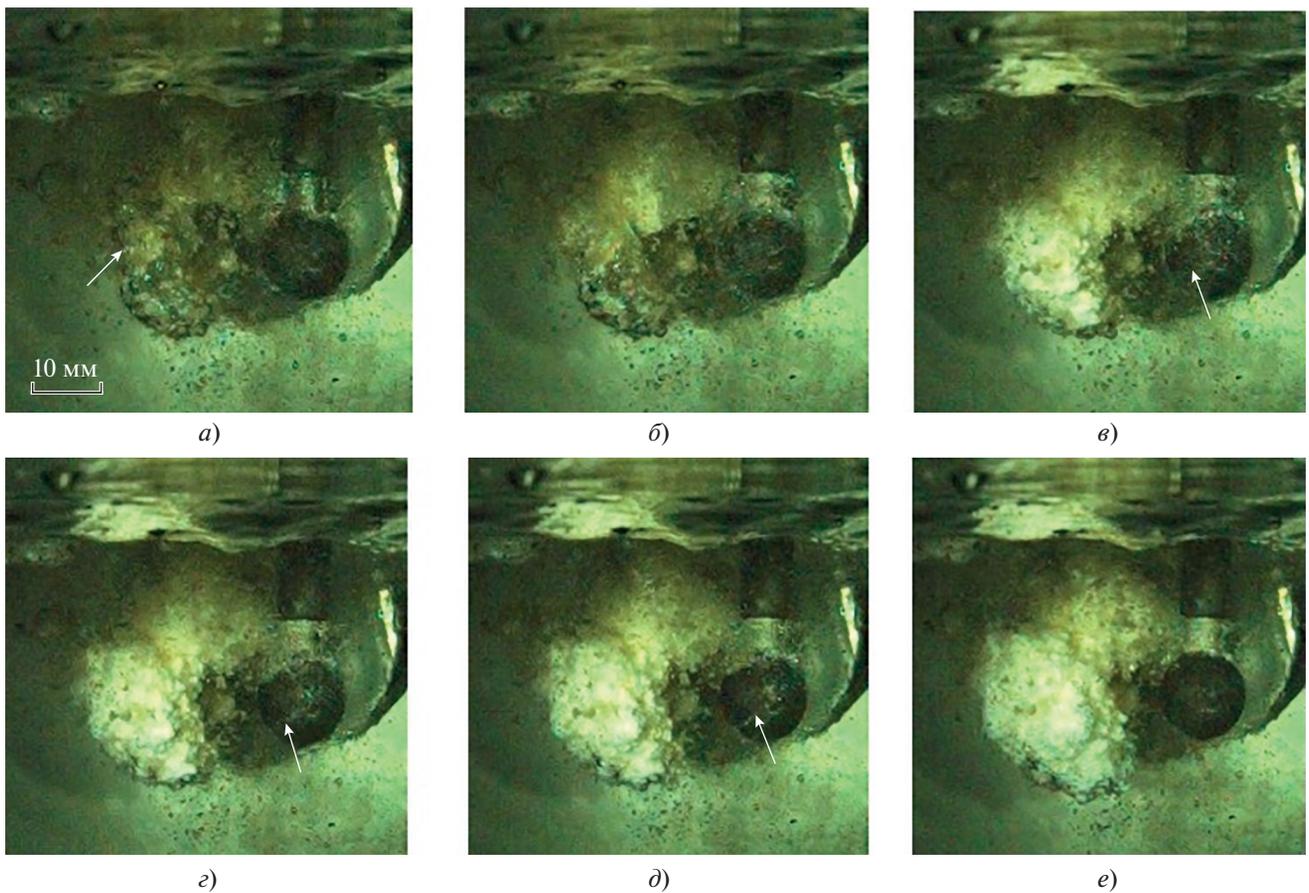


Рис. 4. Сход паровой пленки с твердой сферы диаметром $d_{сф} = 12$ мм после самопроизвольного парового взрыва на близлежащей капле NaCl при $t_{в} = 24^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{NaCl}} = t_{сф} = 1100^{\circ}\text{C}$. Экспозиция – 19 мкс. τ , мкс: *a* – 0; *b* – 600; *c* – 1160; *z* – 1220; *d* – 1260; *e* – 1400

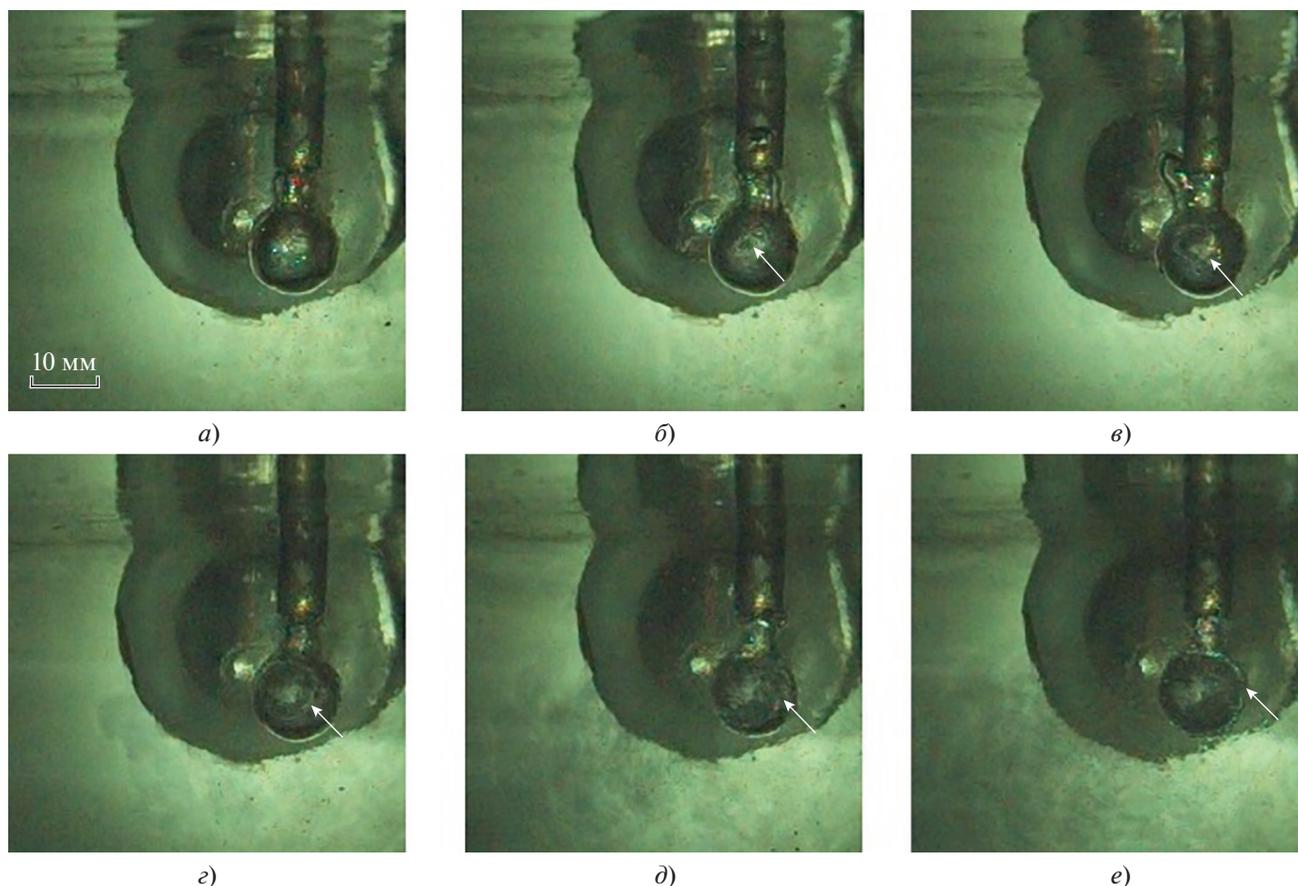


Рис. 5. Самопроизвольный сход паровой пленки с твердой сферы $d_{сф} = 12$ мм при $t_{в} = 24^{\circ}\text{C}$, $t_{сф} = 1020^{\circ}\text{C}$. Экспозиция – 19 мкс.
 τ , мс: а – 0; б – 17.7; в – 169; г – 437; д – 775; е – 1080

зывалось с возникновением колебаний плотности теплового потока q , передаваемого от сферы к жидкости через пленку пара и зависящего от толщины пленки. Это хорошо логически описывается при взрыве на близко расположенной капле, инициирующем волну давления в жидкости, вследствие которой происходит резкое уменьшение толщины пленки пара на сфере и, следовательно, увеличение q . Затем происходит быстрое испарение жидкости и толщина пленки сильно возрастает, вследствие чего резко уменьшается q . Паровая пленка “мгновенно” конденсируется, и сфера быстро охлаждается, что приводит к смене режима кипения с пленочного на пузырьковый. Это может происходить и по прошествии нескольких циклов ранее описанного сценария развития событий.

Можно полагать, что если бы на месте сферы располагалась расплавленная капля металла, то при сходе пленки пара по мгновенному режиму (см. рис. 4), скорее всего, происходили бы ее фрагментация и паровой взрыв.

Таким образом, с помощью высокоскоростной видеосъемки парового взрыва на капле NaCl

и последующего схода пленки с твердой сферы по мгновенному режиму, спровоцированному им, можно моделировать эволюцию фазы триггеринга парового взрыва и его распространение.

Логично было дополнить полученные в описываемых в настоящей статье экспериментах, осуществленных с более детальной, чем в ранних опытах ОИВТ РАН, визуализацией эволюции паровой пленки, синхронизированными с ними инструментальными измерениями контакта жидкости с нагретой сферой. Результаты сопоставления оказались вполне приемлемыми.

На рис. 6 для сравнения приведены кадры видеосъемки схода паровой пленки в “постепенном” режиме после локального контакта жидкости со сферой, зафиксированного в момент, показанный на рис. 6, а. В данном случае не использовался самопроизвольный взрыв близко расположенной капли NaCl.

Синхронизированно с видеосъемкой на ССД осуществлялась запись изменения напряжения в цепи сфера – электрод, погруженный в воду (рис. 7). Анализируя рис. 7, можно сделать вывод, что контакт жидкости со сферой произошел

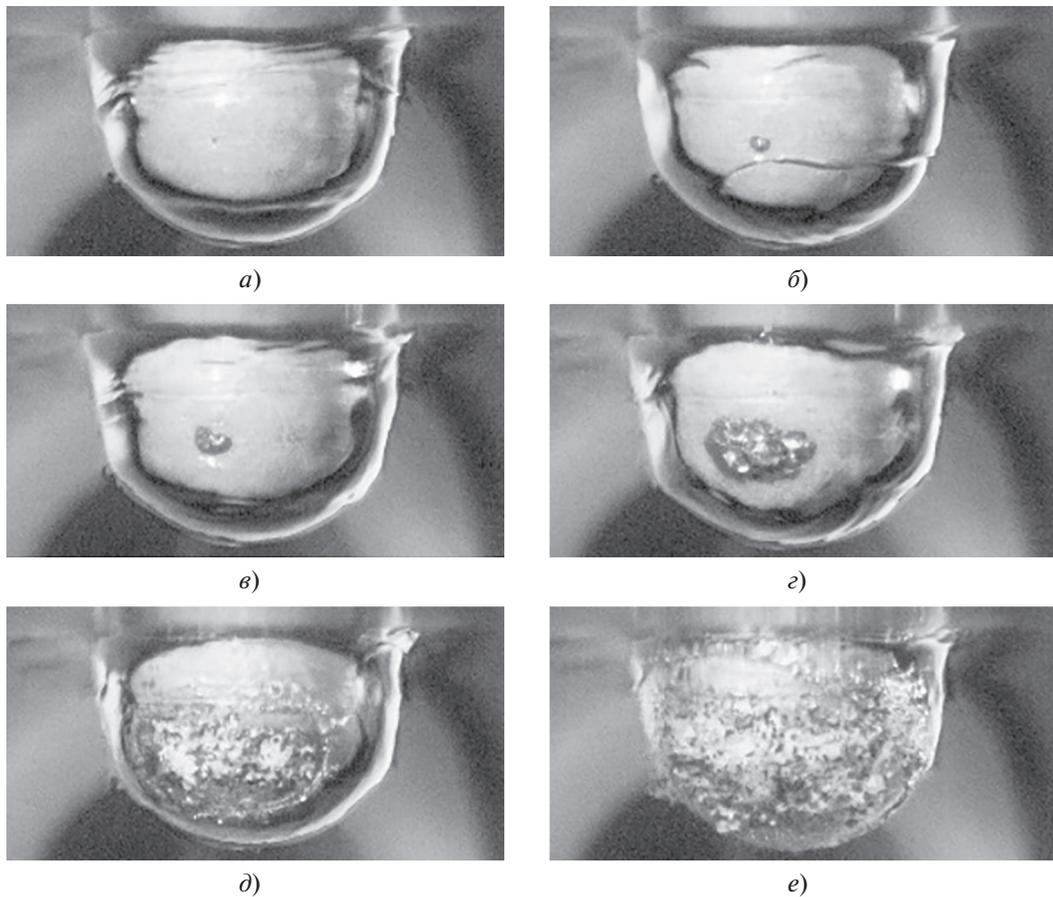


Рис. 6. Сход паровой пленки с твердой сферы $d_{сф} = 18$ мм при $t_{в} = 23^{\circ}\text{C}$, $t_{сф} = 920^{\circ}\text{C}$. Экспозиция – 5 мкс. Размер кадров 17×34 мм.
 τ , мс: *a* – 0; *б* – 5.9; *в* – 12.4; *г* – 37.9; *д* – 62.2; *е* – 64.2

в промежутки времени между кадрами, приведенными на рис. 6, *a*, *б*. На рис. 6, *б* вполне отчетливо зафиксирован этот контакт.

Видеонаблюдения были также дополнены измерениями начального импульса давления в жидкости с помощью высокочастотного датчика давления РСВ 113В24 с пьезочувствительным элементом, расположенного на задней стенке сосуда на уровне предполагаемого нахождения капли, с которой, как ожидалось, начнется процесс триггеринга. Максимальные зафиксированные датчиком значения давления составили около 1 МПа, что довольно хорошо коррелирует с данными, полученными в предыдущих работах [16, 25, 26]. Указанные импульсы давления фиксировались не во всех опытах. Видимо, случайный (стохастический) характер местоположения первичного контакта холодной жидкости и капли не позволял с должной точностью соотнести направление взрыва и ориентацию чувствительного элемента пьезодатчика.

В целом, можно отметить, что проведенные эксперименты подтвердили, что определяющую

роль в триггеринге тонкой фрагментации сантиметровых капель горячей жидкости играет первый контакт холодной жидкости с их поверхностью.

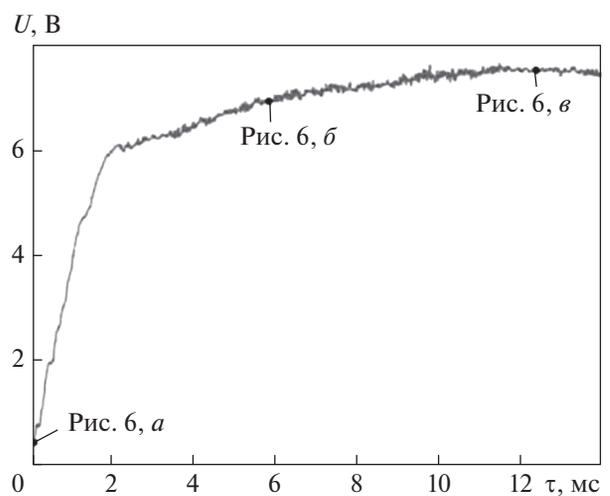


Рис. 7. Изменение напряжения U в цепи сфера – электрод, погруженный в воду, во времени τ

ВЫВОДЫ

1. С использованием высокоскоростной видеосъемки зафиксирован процесс эволюции вскипания жидкости от одной расплавленной капли соли NaCl к каплям соли и олова и от капли NaCl к “крупной” нагретой твердой сфере, покрытой паровой пленкой, воспроизводящий реальный триггеринг и распространение процесса парового взрыва.

2. Быстрый сход паровой пленки с нагретой сферы по мгновенному режиму (в течение 250–300 мкс) после взрыва на близко расположенной капле, по всей видимости, объясняется спровоцированным возникшей волной давления в жидкости уменьшением толщины пленки и последующими колебаниями отводимого теплового потока. При наличии в жидкости соседних расплавленных капель вместо сферы данный механизм должен приводить к их фрагментации.

3. Определяющее значение в триггеринге тонкой фрагментации сантиметровых капель горячей жидкости имеет первый контакт холодной жидкости с их поверхностью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Witte L.C., Cox J.E., Bouvier J.E.** The vapor explosions // *J. Metals*. 1970. V. 39. P. 35–38.
2. **Woodruff W.L.** The PARET code and the analysis of the SPERT I transients. ANL/RERTR/TM-4. 1982.
3. **Reid R.C.** Rapid phase transitions from liquid to water // *Adv. Chem. Eng.* 1983. V. 12. P. 105–208.
4. **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)
5. **Berthoud G.** Vapor explosions // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 2000. V. 32. No. 1. P. 573–611. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.573>
6. **Status of steam explosion understanding and modeling / 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>
7. **Corium behavior and steam explosion risks: A review of experiments / P. Shen, W. Zhou, N. Cassiaut-Louis, C. Journeau, P. Piluso, Y. Liao // Ann. Nucl. Energy.** 2018. V. 121. P. 162–176. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.07.029>
8. **Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е.** Термическое взаимодействие высокотемпературных расплавов с жидкостями // *ТВТ*. 2022. Т. 60. № 2. С. 280–318.
9. **Heat transfer considerations on the spontaneous triggering of vapor explosions – A review / A. Simons, I. Bellemans, T. Crivits, K. Verbeken // Metals.** 2021. V. 11. No. 55. <https://doi.org/10.3390/met11010055>
10. **Corradini M.L.** Molten fuel/coolant interactions: recent analysis of experiments // *Nucl. Sci. Eng.* 1984. V. 86. P. 372–387. <https://doi.org/10.13182/NSE84-A18638>
11. **Magallon D., Huhtiniemi I.** Corium melt quenching tests at low pressure and subcooled water in FARO // *Nucl. Eng. Des.* 2001. V. 204. P. 369–376. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(00\)00318-6](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(00)00318-6)
12. **Huhtiniemi I., Magallon D.** Insight into steam explosions with corium melts in KROTOS // *Nucl. Eng. Des.* 2001. V. 204. P. 391–400. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(00\)00319-8](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(00)00319-8)
13. **Fuel coolant interaction experiments in TROI using a UO₂/ZrO₂ mixture / J.H. Song, I.K. Park, Y.S. Shin, J.H. Kim, S.W. Hong, B.T. Min, H.D. Kim // Nucl. Eng. Des.** 2003. V. 222. No. 1. P. 1–15.
14. **Паровые взрывы: анализ экспериментальных исследований / А.Д. Ефанов, Ю.Н. Загорулько, О.В. Ремизов, Ф.А. Козлов, А.П. Сорокин, И.Л. Богатырев // Теплоэнергетика.** 1997. № 8. С. 17–24.
15. **Экспериментальные исследования термического взаимодействия кориума с теплоносителями / Ю.И. Загорулько, В.Г. Жмурин, А.Н. Волон, Ю.П. Ковалев // Теплоэнергетика.** 2008. № 3. С. 48–58.
16. **Ивочкин Ю.П.** Исследование механизмов термогидродинамических и МГД-процессов с жидкометаллическими рабочими телами: дис. ... докт. техн. наук. М.: ОИВТ РАН, 2015.
17. **Stevens J., Witte L.** Destabilization of vapor film boiling around spheres // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1973. V. 16. No. 3. P. 669–670.
18. **Kikuchi Y., Takeshi E., Michiyoshi I.** Measurement of liquid–solid contact in film boiling // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1992. V. 35. P. 1589–1594. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(92\)90047-V](https://doi.org/10.1016/0017-9310(92)90047-V)
19. **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.
20. **Film boiling collapse in a solid hot sphere immersed in subcooled forced convection / P. Ni, Z. Wen, F. Su, J. Huang, X. Liu, G. Lou, R. Dou // Appl. Therm. Eng.** 2020. V. 166. P. 114630. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114630>
21. **Yagov V.V., Minko K.B., Zabirow A.R.** Two distinctly different modes of cooling high-temperature bodies in subcooled liquids // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2021. V. 167. P. 120838. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120838>
22. **Dullforce T.E., Buchanan D.J., Perckover R.S.** Self-triggering of small-scale fuel–coolant interactions: I. Experiments // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2001. V. 9. P. 1295–1303. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/9/9/006>
23. **Han S.H., Bankoff S.G.** Thermal interaction of molten tin drops with water triggered by low-pressure shock // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1987. V. 30. P. 569–579.
24. **Fragmentation regimes during the thermal interaction between molten tin droplet and cooling water / C. Wang, C. Wang, B. Chen, M. Li, Z. Shen // Int. J.**

- Heat Mass Transfer. 2021. V. 166. P. 120782.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120782>
25. **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. V. 29. No. 3. P. 351–361.
<https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2004.05.013>
 26. **Zyszkowski W.** Study of the thermal explosion phenomenon in molten copper – water system // *Int. J. Heat Mass Transfer.* 1976. V. 19. P. 849–868.
 27. **Phenomena and mechanism of molten copper column interaction with water / J. Song, C. Wang, B. Chen, M. Li, Z. Shen, C. Wang** // *Acta Mechanica.* 2020. V. 231. No. 6. P. 2369–2380.
<https://doi.org/10.1007/s00707-020-02667-x>
 28. **Спонтанный триггеринг парового взрыва: результаты экспериментальных исследований /**
 С.Н. Вавилов, Н.В. Васильев, Ю.А. Зейгарник, А.В. Клименко, Д.А. Скибин // *Теплоэнергетика.* 2022. № 7. С. 15–22.
<https://doi.org/10.1134/S0040363622070074>
 29. **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.
<https://doi.org/10.26583/sv.15.2.04>
 30. **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>
 31. **Jin E., Bussmann M., Tran H.** An experimental study of smelt-water interaction in the recovery boiler dissolving tank // *Tappi J.* 2015. V. 14. No. 6. P. 385–393.
<https://doi.org/10.32964/TJ14.6.385>

Experimental Studies of Phenomena Occurring during Steam Explosion Triggering

N. V. Vasiliev^{a, b, *}, S. N. Vavilov^a, Yu. A. Zeigarnik^a, and E. A. Lidzhiev^{a, b}

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

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

*e-mail: nikvikvas@mail.ru

Abstract—The work is devoted to an experimental study of individual poorly studied stages of steam explosion triggering (a dangerous destructive phenomenon that occurs during certain emergency situations in nuclear energy, metallurgical, pulp and paper, and other industries). Experiments were carried out to study the propagation of the detonation front after spontaneous explosive boiling (triggering) of water on a molten drop of salt (NaCl) and a steam explosion stimulated by it on closely spaced neighboring drops of salt and tin. The temperature of the melted drops in the experiments was 850–1100°C and water temperature was room temperature (22–24°C). The main research tool was high-speed video recording of the process (recording frequency up to 50 kHz, exposure up to 5 μs). In order to study the initial stage of triggering associated with local contact of the cooler with a hot substance, experiments were carried out using high-speed video footage of the process of the vapor film coming off on a hot solid sphere, synchronized with fixing the sphere-cooler contact electrically. The footage of the instantaneous (precipitous) mode of vapor film disappearance with a duration of 200–500 μs and gradual (progressive) mode lasting approximately 100 ms on spheres under similar experimental conditions. It is shown that the main influence on the regime of film melting and steam explosion on molten tin drops is exerted by the pressure pulse from the steam explosion on a nearby NaCl drop. The characteristic times of the triggering process have been determined: tens to hundreds of microseconds. The value of the primary pressure pulse in the liquid has been established. The decisive role in triggering fine fragmentation of centimeter-long drops of hot liquid by the first contact of cold liquid with their surface has been confirmed.

Keywords: steam explosion, subcooled water, molten salt, liquid metals, tin, solid sphere, steam film, electrical contact indicator, spontaneous triggering, high-speed video