ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР, 2022, том 60, № 2, с. 280–318

ОБЗОР

УДК 536.24,536.423,621.039

ТЕРМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ РАСПЛАВОВ С ЖИДКОСТЯМИ

© 2022 г. В. И. Мелихов[1, 2, *], О. И. Мелихов[1, 2], С. Е. Якуш[3]

[1]Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", Москва, Россия

[2]Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС, Электрогорск, Россия

[3]Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

*E-mail: vladimir.melikhov@erec.ru

Поступил в редакцию 31.05.2021 г.
После доработки 17.08.2021 г.
Принят к публикации 28.09.2021 г.

Выполнен обзор экспериментальных и расчетно-теоретических работ, посвященных изучению взаимодействия высокотемпературных расплавов с жидкостями, которые могут приводить к высвобождению механической энергии (паровые взрывы), что представляет потенциальную опасность для промышленных объектов, в первую очередь для АЭС. Рассмотрены как крупномасштабные паровые взрывы с участием десятков килограммов расплавов, так и маломасштабное взаимодействие одиночных капель расплава с жидкими охладителями. Отмечена важность режима неустойчивого пленочного кипения для определения условий инициирования парового взрыва. Проанализированы исследования влияния отвердевания поверхности расплава на термическое взаимодействие расплава с охладителем. Показана роль процессов окисления расплава в процессе развития парового взрыва.

DOI: 10.31857/S0040364422020284

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение

1. Сценарии взаимодействия расплава с охладителем в ходе аварий на АЭС

1.1. Струя расплава–бассейн с охладителем

1.2. Слой охладителя–слой расплава

1.3. Струя охладителя–бассейн расплава

2. Крупномасштабные паровые взрывы

2.1. Схема протекания крупномасштабного парового взрыва

2.2. Крупномасштабные экспериментальные установки и исследовательские программы

2.3. Основные результаты экспериментальных исследований

2.4. Фрагментация струи расплава в охладителе – необходимое условие для крупномасштабного парового взрыва

2.5. Обсуждение

3. Маломасштабное взаимодействие расплава с охладителем

3.1. Фрагментация капли расплава

3.2. Неустойчивое пленочное кипение

3.3. Обсуждение

4. Влияние отвердевания поверхности расплава на термическое взаимодействие расплава с охладителем

4.1. Эксперименты по изучению отвердевания поверхности расплава

4.2. Теоретические модели отвердевания поверхности расплава

4.3. Обсуждение

5. Роль окисления расплава при термическом взаимодействии расплава с водой

5.1. Влияние окисления расплава

5.2. Существующие подходы

5.3. Обсуждение

Заключение

Список литературы

ВВЕДЕНИЕ

Быстрые фазовые переходы, в ходе которых происходит резкое увеличение удельного объема системы, встречаются в различных областях техники и в природных явлениях. Как правило, они являются результатом неконтролируемого выделения энергии и контакта высокотемпературных материалов с легко вскипающими жидкостями (охладителями) либо разрушения оболочки резервуара с содержащейся под высоким давлением жидкостью (сжиженным газом).

С точки зрения классической термодинамики, фазовый переход первого рода представляет собой изменение агрегатного состояния вещества, происходящее в определенных точках на диаграм-

ме давление–температура, совокупность которых образует так называемые кривые фазового перехода (кипения, плавления, сублимации). Фазовый переход сопровождается выделением или поглощением соответствующей энергии (скрытой теплоты фазового перехода). С точки зрения механики и теплофизики, однако, важнейшее значение имеет скорость, с которой происходит изменение агрегатного состояния вещества. В первую очередь это касается испарения, сопровождающегося значительным увеличением удельного объема вещества. Переход части выделяющейся энергии в кинетическую энергию и механическую работу расширения вещества может сопровождаться газодинамическими явлениями – распространением ударных волн, разлетом высокоскоростных струй и капель, представляющих собой значительный фактор опасности. Взрывы такого типа относят к "физическим", поскольку их причины не связаны с протеканием экзотермических химических реакций.

Интерес к изучению гидродинамических и теплофизических аспектов взрывных явлений при быстрых фазовых переходах в значительной мере продиктован проблемами безопасности атомной энергетики, в особенности – необходимостью прогноза последствий тяжелых аварий с плавлением активной зоны реактора, выработкой мероприятий по предотвращению или снижению опасности таких аварий. При развитии тяжелой аварии на АЭС с реакторами на легкой воде типа ВВЭР/PWR вероятен прямой контакт расплава материалов активной зоны реактора (кориума) с теплоносителем (водой) в корпусе реактора или в шахте. При контакте двух жидкостей с существенно различными температурами, когда температура одной из жидкостей значительно превышает температуру кипения другой (например, высокотемпературный кориум и вода или натрий), при определенных условиях происходит быстрое вскипание холодной жидкости, сопровождающееся резким ростом давления в зоне термического взаимодействия и быстрым расширением многофазной смеси. Это явление, получившее название "паровой взрыв" (в англоязычной литературе – steam explosion или vapor explosion), представляет значительную опасность, поскольку может приводить к существенным динамическим воздействиям на конструкции реактора и контейнмента и создавать угрозу их целостности. В связи с возможным выходом радиоактивных продуктов деления в атмосферу и вызванными этим катастрофическими последствиями данное явление активно изучается последние полвека.

В западной литературе, начиная с 1970-х гг., достаточно регулярно выходят обзорные статьи, посвященные различным аспектам исследования парового взрыва [1–8]. В России освещению этой проблемы уделялось не столь много внимания – сначала в [9] были обобщены и систематизированы зарубежные исследования парового взрыва на конец 1980-х гг., затем краткий обзор экспериментальных исследований был представлен в [10]. Наконец, в недавней монографии [11] была сделана попытка углубленно рассмотреть несколько важных направлений в этой области исследований, но ряд проблем (одиночные капли расплава, неустойчивое пленочное кипение, окисление и затвердевание расплава) при этом остался неохваченным.

В настоящем обзоре представлены и проанализированы результаты экспериментальных и теоретических исследований термического взаимодействия высокотемпературных расплавов с жидкостями, отражающие современное понимание проблемы парового взрыва.

1. СЦЕНАРИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА С ОХЛАДИТЕЛЕМ В ХОДЕ АВАРИЙ НА АЭС

1.1. Струя расплава–бассейн с охладителем. В ходе развития тяжелой аварии плавление твэлов происходит в центральной верхней части активной зоны, где их температура максимальна. Начальный состав расплава представляет собой смесь оксидов урана и циркония, которая в виде капель или ручейков стекает вниз по твэлам и отвердевает в нижних частях твэлов, где их оболочка более холодная. Процесс аналогичен горению свечи: когда пламя растапливает воск, то он стекает вниз в виде капель или ручейков и затвердевает. Далее образуются закупорки или пробки из большого количества застывших капель расплава, а дальнейшее развитие этого процесса приводит к формированию застывшей корки расплава, служащей своеобразным днищем для удержания расплава. В ходе последующего развития аварии это образование разрушается, и расплав падает в нижнюю часть корпуса, где может находиться вода. Тем самым создаются условия для внутрикорпусного парового взрыва (рис. 1а). Если вода в нижней части реактора отсутствует или взаимодействие расплава с водой не носило взрывного характера, то расплав контактирует с днищем шахты, нагревая и проплавляя его, после чего оказывается в подреакторном пространстве. При наличии здесь воды создается возможность внекорпусного парового взрыва (рис. 1б).

1.2. Слой охладителя–слой расплава. При тяжелых авариях на АЭС с плавлением материалов активной зоны реактора возможны сценарии, когда образующийся кориум проливается в объем с водой, причем глубина слоя воды недостаточна для существенной фрагментации струи расплава. В этом случае расплав достигает дна бассейна и растекается по нему под слоем воды, образуя расслоенную (стратифицированную) конфигура-

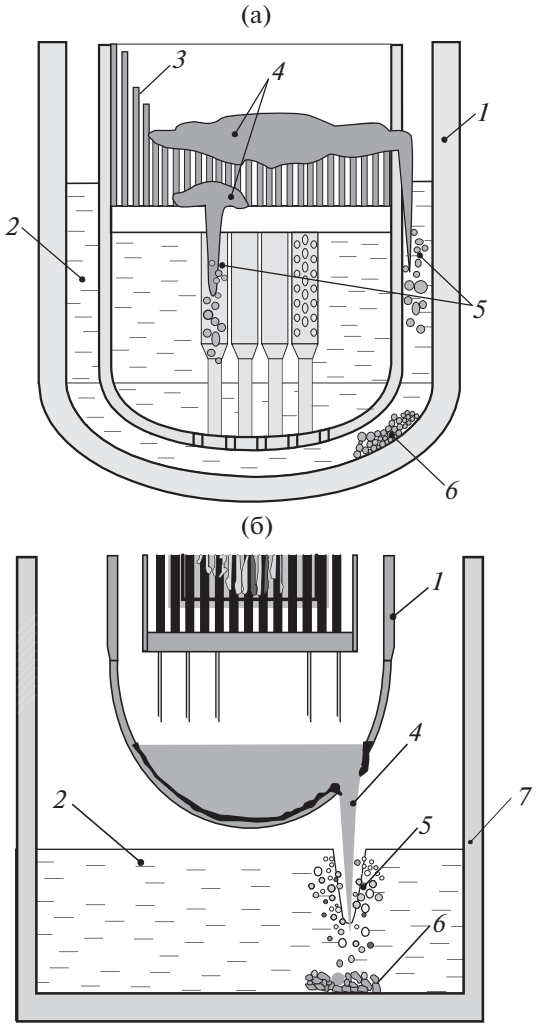

Рис. 1. Внутрикорпусное (а) и внекорпусное (б) взаимодействие кориума с водой: *1* – корпус реактора, *2* – охладитель, *3* – твэлы, *4* – расплав кориума, *5* – зона взаимодействия, *6* – дисперсные дебрисы, *7* – бассейн в подреакторном пространстве.

цию, схематически представленную на рис. 2. Такая же конфигурация расплава и воды может возникнуть в устройствах локализации расплава активной зоны (ловушках), когда растекающийся по днищу ловушки кориум заливается сверху слоем воды. До недавнего времени считалось, что при таком расположении паровой взрыв обладает недостаточным энергетическим потенциалом для того, чтобы вызвать серьезные разрушительные последствия. Однако недавние экспериментальные исследования стратифицированных паровых взрывов [12] продемонстрировали их значительную опасность, что свидетельствует о наличии механизмов предварительного перемешивания расплава с водой в процессе растекания.

1.3. Струя охладителя–бассейн расплава. В настоящее время большое внимание привлекают

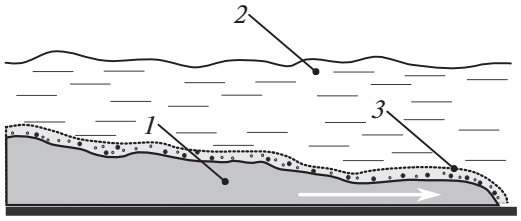

Рис. 2. Стратифицированная конфигурация при растекании слоя расплава по дну бассейна: *1* – расплав, *2* – охладитель, *3* – зона предварительного перемешивания.

реакторные установки нового поколения с жидким свинцом в качестве теплоносителя, для которых характерная температура на выходе из реактора составляет 813 K, а давление в парогенераторе – 0.8 МПа [13]. В теплообменных трубках парогенератора течет вода под давлением 18 МПа, температура воды на входе равна 613 K, на выходе – 778 K. Разрыв трубки парогенератора классифицируется как проектная авария (межконтурная неплотность), что предусматривает детальное исследование последствий разрыва. При истечении воды высокого давления в жидкий свинец образуется пароводяная каверна, на границе которой вследствие развития неустойчивостей происходит перемешивание с возникновением многофазной смеси свинец–вода–пар. Кроме того, паровой взрыв может возникать и при резком вскипании капель воды, захваченных свинцом (так называемый “обратный паровой взрыв”). Данные сценарии схематически представлены на рис. 3.

В настоящей обзорной статье рассматриваются результаты исследований, связанных с первым сценарием, приводящим к наиболее мощным паровым взрывам.

2. КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ПАРОВЫЕ ВЗРЫВЫ

2.1. Схема протекания крупномасштабного парового взрыва. Общее понимание схемы протекания крупномасштабного парового взрыва к настоящему времени является устоявшимся. Выде-

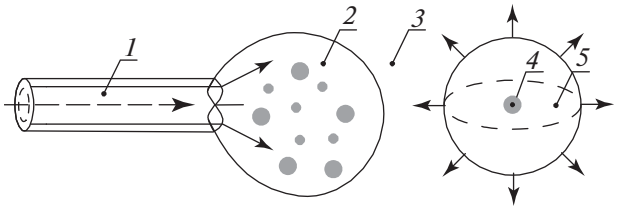

Рис. 3. Истечение вскипающей воды в расплав: *1* – дефектная трубка парогенератора, *2* – пароводяная каверна, *3* – расплав, *4* – водяная капля, *5* – область расширяющегося пара.

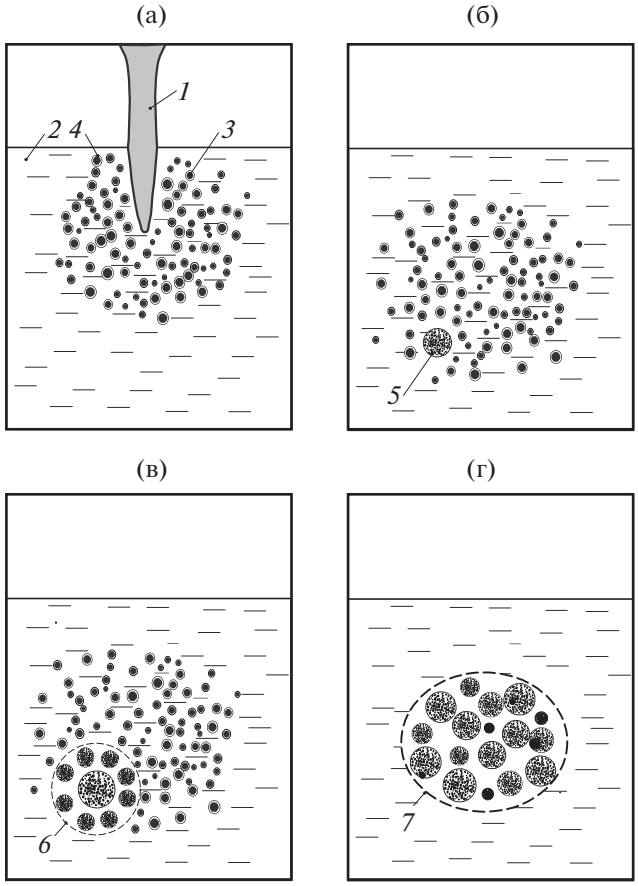

Рис. 4. Стадии парового взрыва: (а) – предварительное перемешивание при распаде струи расплава в охладителе, (б) – инициирование, (в) – распространение фронта термической детонации, (г) – расширение продуктов взрыва; *1* – струя расплава, *2* – охладитель, *3* – капли расплава, *4* – паровая пленка, *5* – область инициирования, *6* – фронт термической детонации, *7* – продукты термической детонации.

ляют следующие основные стадии процесса: 1) дробление струи расплава и перемешивание образовавшихся капель расплава с охладителем (создание смеси, потенциально способной к взрыву); 2) инициирование взрыва (внешний или самопроизвольный триггер); 3) распространение волны термической детонации и 4) расширение продуктов взрыва (рис. 4).

Для изучения закономерностей протекания сложных взаимосвязанных процессов при паровых взрывах выполнено несколько исследовательских программ с использованием в экспериментах десятков килограммов высокотемпературных расплавов. Наряду с этим выполнялись исследования на маломасштабных установках, где изучались фундаментальные вопросы фрагментации отдельных капель расплава в охладителе, физики взрыва таких капель, закономерностей пленочного кипения на горячих поверхностях и его влияния на данные процессы и т.д.

Синтез полученных результатов и сформировавшихся знаний осуществлялся в форме создания многомерных расчетных кодов, основанных на принципах механики многофазных сред, в состав которых входили разработанные модели отдельных явлений [5, 6, 14–16].

2.2. Крупномасштабные экспериментальные установки и исследовательские программы. Достаточно подробный анализ экспериментальных программ, посвященных исследованию парового взрыва, приведен в [8, 11]. В табл. 1 обобщены основные сведения о выполненных на сегодняшний день крупномасштабных экспериментах по взаимодействию струи расплава с охладителем. В этих экспериментах, как правило, последовательно реализовывались все упомянутые выше стадии парового взрыва.

Как видно из табл. 1, в экспериментах в качестве расплава использовались как реальные композиции (кориум), так и оксиды (Al_2O_3, ZrO_2) и сплавы ($Fe–Al_2O_3$). Основными характеристиками парового взрыва являются пиковое давление в рабочей камере и коэффициент конверсии, представляющий собой отношение механической энергии (включающей кинетическую энергию продуктов и работу расширения) к запасенной тепловой энергии расплава.

2.3.Основные результаты экспериментальных исследований. 1. Экспериментальные исследования, выполненные на различных установках, однозначно подтверждают схему развития парового взрыва через следующие основные стадии: предварительное перемешивание расплава с охладителем, инициирование и последующее распространение взрывной волны, завершающееся расширением продуктов взрыва (см. рис. 4).

2. Энергетика парового взрыва сильно зависит от материала расплава. Наиболее мощные взрывы наблюдались для $Al_2O_3–Fe$ и Al_2O_3, коэффициент конверсии достигал 3–5%. Расплавы, содержащие материалы активной зоны ядерного реактора (UO_2, ZrO_2, Zr, сталь), взрываются хуже, коэффициент конверсии для них снижается на порядок, до 0.1–0.7%.

3. Наблюдается зависимость от давления окружающей среды. При увеличении давления окружающей среды самопроизвольный взрыв менее вероятен. Но использование внешнего триггера может позволить получить взрыв в области параметров, где не наблюдалось спонтанных взрывов. Также следует отметить, что более мощные паровые взрывы происходят при более высоком давлении окружающей среды.

4. Имеет место влияние температуры охладителя – чем она ближе к температуре насыщения,

Таблица 1. Основные сведения об экспериментах на крупномасштабных установках

Эксперименты	Материал расплава/число опытов	Расплав: масса, кг/температура, K	Вода: уровень, м/масса, кг	Давление, бар/недогрев воды, K	Основные результаты
SNL (США, 1979) Open Geometry, [17]	UO_2–ZrO_2–Fe–NiO–Mo/10 Fe–Al_2O_3/50	5–20/2800	0.3–1/175–840	1/80–0	1) Для кориума паровых взрывов не зафиксировано. 2) Для Fe–Al_2O_3 паровые взрывы наблюдались в большинстве опытов. Коэффициент конверсии – 0.2–1.4%. Пики давления амплитудой 20 МПа и длительностью менее 1 мс
SNL (США, 1981–1983) FITS A, B, [18]	Fe–Al_2O_3/12	2–19/2800	0.3–0.76/57–283	1/64–5	Паровой взрыв в девяти опытах. Коэффициент конверсии – 0.3–1.6%. Пики давления амплитудой 20 МПа и длительностью ~1 мс. Скорость взрывной волны – 200–600 м/с
ALPHA (Япония, 1991–1999), [19, 20]	Fe–Al_2O_3/23	10–20/2700	0.3–1/318–816	1–16/187–1	Паровой взрыв в 13 опытах. Коэффициент конверсии – 0.66–5.67%
FARO (ЕС, 1995–2000), [21, 22]	UO_2–ZrO_2/12	18–177/3000	0.9–2/нет данных	2–50/124–0	Паровой взрыв в одном опыте (P = 4 бар, T_w = 294 K, внешний триггер), коэффициент конверсии – 0.14–0.39%, пик давления – 10.5 МПа, скорость волны – 370 м/с
KROTOS (ЕС, 1995–2000), [23, 24]	Al_2O_3/10	1.4–1.75/2465–2750	~1.3/33–37	1–3.7/120–5	Паровой взрыв в шести опытах. Коэффициент конверсии – 0.9–2.5%, в одном опыте – 12.7%. Пик давления –57–127 МПа, скорость волны ~1000 м/с
	UO_2–ZrO_2/7	3.1–5.4/3018–3129	~1.3/31–36	1–3.7/126–4	Паровой взрыв в одном опыте. Коэффициент конверсии – 0.15%. Пик давления – 25.8 МПа, скорость волны – 340 м/с

Таблица 1. Продолжение

Эксперименты	Материал расплава/число опытов	Расплав: масса, кг/температура, K	Вода: уровень, м/масса, кг	Давление, бар/недогрев воды, K	Основные результаты
KROTOS (CEA) KS – 1–6 (2007–2011), [25]	UO_2–ZrO_2–(Zr)/6	0.8–3.9/2850–3049	1.1/~31	2–4/54–118	Паровой взрыв в пяти опытах. Коэффициент конверсии – 0.08–0.18%. Пик давления – 9.4–44.7 МПа
TROI 1–5 (2002), [26]	ZrO_2/5	2.9–5.5/>3373	0.67/283	1/81–8	Паровой взрыв в двух опытах. Пик давления – 0.9–2 МПа
TROI 9–15 (Корея, 2003), [27, 28]	UO_2–ZrO_2/6 ZrO_2/1	2.3–9.2/2600–3800	0.67–0.9/189	~1/88–75	Паровой взрыв в пяти опытах. Состав кориума: 70% UO_2 + 30% ZrO_2 (эвтектика). Пик давления для UO_2–ZrO_2 –0.8–7 МПа, для ZrO_2 – 11.5
TROI 43–48 (Корея, 2006–2008), [29]	UO_2–ZrO_2–(Fe)/5 ZrO_2/1	5.5–13/2826–3302	0.95–1.3/269–468	~1/86–42	Паровой взрыв в двух опытах. Состав кориума: 70% UO_2 + 30% ZrO_2 (эвтектика). Пик давления для UO_2–ZrO_2 – 5.7 МПа, для – ZrO_2 8.5
ФЭИ (2008), [30, 31]	Fe–ZrO_2/5	0.06–0.41/3100	Нет данных/11	1/80	Паровой взрыв в одном опыте. Коэффициент конверсии – 3.95%. Пик давления – 8.7 МПа, скорость волны –200 м/с
TROI 51–59 (Корея, 2006–2008), [32–34]	UO_2–ZrO_2–(Zr, Fe)/6 ZrO_2/2	6.3–12.5/2500–2930	0.95–1.3/67–367	~1/93–74	Паровой взрыв в шести опытах. Кориум разного состава. Пик давления – 8–32 МПа. Коэффициент конверсии – 0.04–0.4%
TROI TS–1–6 (Корея, 2007–2011), [25]	UO_2–ZrO_2–(Zr, U, Fe_2O_3)/6	9.3–17.9/~3000	1/~280	2–4/118–54	Паровой взрыв в пяти опытах. Кориум разного состава. Пик давления – 7–25 МПа. Коэффициент конверсии – 0.12–0.66%

тем меньше вероятность возникновения самопроизвольного парового взрыва.

5. Развитию парового взрыва препятствует выделение неконденсирующихся газов, в частности, водорода. Газы повышают устойчивость паровой пленки, препятствуя ее схлопыванию, и увеличивают объемное паро/газосодержание смеси.

6. Повышение температуры расплава, с одной стороны, препятствует его раннему затвердеванию, исключающему возможность фрагментации, однако, с другой стороны, высокая температура расплава усиливает теплообмен излучением, вызывая более интенсивное испарение охладителя, что повышает паросодержание смеси и способствует формированию более толстой паровой пленки около капель расплава. Поэтому влияние данного фактора оказывается неоднозначным.

2.4. Фрагментация струи расплава в охладителе – необходимое условие для крупномасштабного парового взрыва. Струя расплава, проникая в жидкий охладитель, может дробиться под воздействием внутренних неустойчивостей, либо неустойчивостей, вызванных внешними воздействиями, а также в результате срыва и уноса вещества с поверхности струи. Разделяют первичный распад струи, в ходе которого от нее отделяются начальные образования (связки, кластеры и первые капли), и вторичный распад, когда происходит дальнейшее дробление этих образований. В процессе распада совместное действие сил различной природы на поверхность жидкости нарушает ее целостность, вызывая дробление. К этим силам относятся силы инерции, поверхностного натяжения, аэродинамические силы и силы вязкого трения. В зависимости от соотношения этих сил реализуются различные режимы дробления струи.

Процесс дробления струи высокотемпературного расплава в охладителе протекает более сложным образом по сравнению с достаточно хорошо изученным случаем дробления струи жидкости в газе из-за дополнительных явлений, возникающих вследствие особенностей свойств материалов и параметров этой системы. Среди таких явлений следует отметить следующие: 1) кипение охладителя, приводящее к возникновению паровой пленки около струи, 2) затвердевание поверхности струи расплава вследствие охлаждения, 3) окисление расплава при наличии в нем металлических компонент, с выделением неконденсирующегося газа (водорода), 4) захват струей воздуха на пути к бассейну с охладителем.

Основными количественными характеристиками процесса дробления струи являются длина распада, т.е. длина, на которой сохраняется когерентное ядро струи, и средний размер фрагментов, в качестве которого обычно рассматривается среднемассовый диаметр.

Для определения длины распада струи L_{brk} имеется несколько полуэмпирических корреляций, из которых наиболее часто используются корреляции Саито [35] и Эпштейна–Фауске [36]. Корреляция Саито получена в экспериментах со струями воды, вливаемыми во фреон-11 и жидкий азот. Около струй всегда присутствовала толстая пленка пара. Для длины распада струи было предложено следующее соотношение:

$$\frac{L_{brk}}{D_j} = 2.1\sqrt{\varepsilon \mathrm{Fr}}, \tag{1}$$

где $\varepsilon = \frac{\rho_j}{\rho_l}$ – отношение плотностей расплава и охладителя, $\mathrm{Fr} = \frac{V_j^2}{gD_j}$ – число Фруда, V_j – скорость струи, D_j – начальный диаметр струи.

В основе корреляции (1) лежит уравнение баланса энергии струи, записанное в интегральной форме и предполагающее, что кинетическая энергия струи, входящей в жидкость, тратится на работу силы плавучести и работу силы трения со стороны окружающей среды.

В работе Эпштейна и Фауске [36] было рассмотрено уравнение, связывающее скорость вовлечения в газовую струю окружающего газа другой плотности [37], и с помощью теории неустойчивости Кельвина–Гельмгольца было выполнено его обобщение на случай фрагментации струи жидкости, движущейся в другой жидкости или в газе. Это позволило, привлекая предположение В.Г. Левича о постоянстве скорости сплошной части фрагментирующейся струи [38], в этой же работе [36] получить следующую формулу для длины распада струи жидкости большой плотности в газе или в другой жидкости в виде

$$\frac{L_{brk}}{D_j} = \frac{1}{2E_0}\sqrt{\varepsilon}, \tag{2}$$

где E_0 – коэффициент вовлечения ($E_0 = 0.05$–0.1).

Отметим, что в [38] на основании теории Кельвина–Гельмгольца была получена близкая к (2) формула для случая, когда плотность окружающего газа много меньше плотности струи. Несколько позже на основе анализа данных по распаду струй жидких металлов в воде схожую формулу получил Тейлор [39].

Основное различие корреляций (1) и (2) состоит в том, что корреляция Саито (1) предсказывает линейную зависимость длины распада от скорости струи, в то время как в корреляции Эпштейна–Фауске (2) такая зависимость отсутствует. Это объясняется тем, что наличие пленки пара замедляет дробление струи расплава (что подтверждает и линейный анализ [40]), при этом ско-

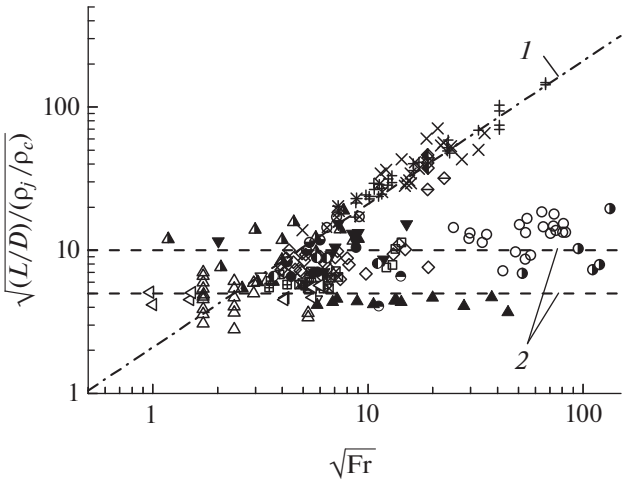

Рис. 5. Сравнение корреляций Саито [35] (*1*) и Эпштейна–Фауске [36] (*2*) с экспериментальными данными (см. [11, 41]).

рость фрагментации определяется параметрами пара (плотность и скорость). Очевидно, что в данном случае увеличение скорости струи будет приводить к более глубокому проникновению струи и возрастанию длины распада. Если роль пленки мала (большие недогревы охладителя или малая температура расплава), то увеличение скорости струи, с одной стороны, способствует более глубокому проникновению струи в охладитель, а, с другой стороны, при этом возрастает скорость фрагментации струи по механизму Кельвина–Гельмгольца. В результате увеличение скорости струи в данном случае не приводит к изменению длины распада струи.

В [41] предпринята попытка нанести весь массив известных экспериментальных данных по длине распада струи на один график, имеющий безразмерные координаты $\frac{L_{brk}}{D_j\sqrt{\varepsilon}} - \sqrt{\mathrm{Fr}}$ вместе с зависимостями (1), (2) для того, чтобы выявить степень близости к той или другой корреляции (рис. 5). Получено, что почти все экспериментальные значения близки к корреляции Эпштейна–Фауске (2), однако в экспериментах с летучими жидкостями (фреон и азот) и охладителем с температурой вблизи насыщения длина распада струи хорошо описывается корреляцией Саито (1). Также имеются данные, которые не укладываются в такую, на первый взгляд, логичную закономерность.

Все экспериментальные исследования по дроблению струй расплава сопровождаются анализом распределения образующихся фрагментов по размерам и определением среднемассового диаметра. Установлено, что основное влияние на процесс дробления оказывает гидродинамический механизм фрагментации, также в определенных условиях имеют значения эффекты, связанные с тепловым взаимодействием (возникновение термических напряжений, захват расплавом охладителя с последующим быстрым испарением). Термические эффекты влияют, в первую очередь, на форму образующихся фрагментов. Если их роль невелика, то фрагменты имеют гладкую форму, близкую к сферической, в противном случае образуются осколки с острыми краями и пористой структурой [42]. Также следует отметить, что существенное влияние на процесс дробления струи может оказывать затвердевание поверхности расплава, взаимодействующего с охладителем.

Среднемассовый диаметр фрагментов по порядку величины достаточно удовлетворительно предсказывается теорией неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Отметим, что иногда в зарубежной литературе по этому предмету, особенно в работах китайских исследователей, встречается термин “теория критического числа Вебера”, который по существу обозначает ту же теорию Кельвина–Гельмгольца для предельного случая, когда плотность одной из фаз много меньше плотности другой. При этом трактовка исследуемых процессов выражается в терминах критического числа Вебера $\mathrm{We}_{\mathrm{cr}}$, которое соответствует неустойчивости Кельвина–Гельмгольца, и по нему определяются характерные размеры образующихся фрагментов $d = \frac{\mathrm{We}_{\mathrm{cr}}\sigma_j}{\rho_c V_j^2}$ (здесь ρ_c – плотность окружающей жидкости, σ_j – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела, V_j – скорость струи). В отличие от теории Кельвина–Гельмгольца, теория неустойчивости Рэлея–Тейлора, согласно которой длина наиболее быстрорастущей длины волны $\lambda_{RT} = 2\pi\sqrt{\frac{3\sigma_j}{(\rho_j - \rho_c)g}}$ (где g – ускорение силы тяжести), значительно завышает размер фрагментов.

Было выполнено большое количество экспериментальных исследований процесса дробления струи расплава (без дальнейшего парового взрыва). Подробный перечень экспериментов по дроблению струй, выполненных до 2018 г., приведен в обзорной статье [41]. В табл. 2 даны основные сведения о недавних экспериментальных программах в этой области, проведенных в 2014–2021 гг.

2.5. Обсуждение. Анализ табл. 2 позволяет констатировать, что выполненные в последнее время исследования подтверждают ранее выявленные тенденции и закономерности фрагментации струй расплавов в охладителях. Прежде всего это относится к размерам образующихся фрагментов, которые хорошо описывает теория Кельвина–Гельмгольца. Доминирующий механизм фраг-

Таблица 2. Основные сведения об экспериментах по дроблению струи расплава в охладителе

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Основные результаты
	материал/диаметр струи, мм/скорость, м/с/температура, °C (перегрев, °C)/плотность, г/см^3	вещество/давление, бар/температура, °C/уровень, м	
MISTEE-Jet (Швеция, 2014–2018), [43–46]	WO_3–Bi_2O_3/5; 10/1–2/1000; 1200 (130; 330)/6.2	Вода/1/20–90/0.465	1) Для всех расплавов безразмерная длина распада струи пропорциональна корню квадратному из отношения плотностей расплава и охладителя, но не зависит от скорости струи и недогрева воды, т.е. описывается корреляцией Эпштейна–Фауске. 2) Для легкоплавких эвтектик при малых недогревах воды образующиеся фрагменты имели в основном гладкую форму, при больших недогревах преобладали растесканные фрагменты с острыми краями. Размер фрагментов: 1) WO_3– ZrO_2 – 4–6 мм; 2) WO_3–Bi_2O_3– 1–3 мм. 3) Фрагменты металлов – гладкие продолговатые частицы для струй малого диаметра, а для струй большого диаметра – частицы с шероховатыми краями. Размер фрагментов – 5–8 мм
	WO_3–ZrO_2/5; 10/1–2/1390 (160)/5.6		
	Металл Вуда/5; 10/1–2/90–107 (20–37)/9.7		
JEBRA (Швеция, 2017–2018), [45, 46]	Металл Вуда/20; 30/1–5/90–103 (20–33)/9.7	Вода/1/10/2.4	
COLDJET (Корея, 2016–2018), [47–50]	Металл Вуда/50/1–4/85 (15)/9.7	Вода/1/40/1	1) Размер фрагментов уменьшается при увеличении скорости струи: 1 м/с – 4.7–9.5 мм; 3 – 1–9.5; 4 – 1–2.8. 2) Размер фрагментов хорошо предсказывает теория Кельвина–Гельмгольца. 3) Длина распада струи хорошо описывается корреляцией Эпштейна–Фауске
METRIC (КНР, 2017), [51]	Олово/10; 40/3.8–4.5/390–990 (159–759)/7.3	Вода/1/22–24/1	1) Безразмерная длина распада струи увеличивается вместе с числом Фруда и лучше всего описывается корреляцией IKEMIX. 2) Размер фрагментов сильно уменьшается с ростом температуры расплава (снижается влияние затвердевания) – от 7.7 до 4.1 мм. 3) Размеры фрагментов коррелируют со значениями, которые предсказывает теория Кельвина–Гельмгольца

Таблица 2. Продолжение

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Основные результаты
	материал/диаметр струи, мм/скорость, м/с/температура, °C (перегрев, °C)/плотность, г/см^3	вещество/давление, бар/температура, °C/уровень, м	
VTMCI (КНР, 2020), [52]	Сплав Bi–Sn–In/5–30/1.98–3.43/473–773 (112–412)/8.6	Вода/1/25–80/0.2–0.6	1) Основные факторы, определяющие поведение струи расплава, – температуры расплава и воды. Повышение температур воды и расплава приводит к более полной фрагментации струи с образованием большего количества мелких сферических частиц. 2) Увеличение скорости струи способствует фрагментации расплава в воде, но не влияет на форму частиц и пористость образующейся подложки. 3) Увеличение диаметра струи обеспечивает большую глубину проникновения струи, но не влияет на другие характеристики процесса. 4) Уменьшение глубины воды ограничивает процесс фрагментации струи. 5) Размеры фрагментов коррелируют со значениями теории Кельвина–Гельмгольца, учитывающей затвердевание
Institute of Nuclear Energy Safety Technology (КНР, 2015–2017), [53, 54]	Эвтектика свинец–висмут/5; 8/2–3/300–600 (175–475)/10.38	Вода/1/20–80/нет данных	1) Размер фрагментов – 2.8–6.7 мм хорошо коррелирует с теорией Кельвина–Гельмгольца. 2) С увеличением температуры воды форма фрагментов становится более округлой
University of Tsukuba (Япония, 2019), [55]	Эвтектика висмут–олово/15; 20/1.7–3.2/150–350 (12–212)/8.56	Вода/1/20–80/0.8–1.2	1) Изучалось влияние затвердевания на дробление струи расплава. 2) Выявлено четыре режима дробления: а) полная фрагментация, б) частичная фрагментация, в) деформация, г) затвердевание. 3) Предложена карта режимов, основанная на двух безразмерных параметрах – модифицированное число Стефана и число Вебера

Таблица 2. Продолжение

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Основные результаты
	материал/диаметр струи, мм/скорость, м/с/температура, °C (перегрев, °C)/плотность, г/см^3	вещество/давление, бар/температура, °C/уровень, м	
City University of Hong Kong (KHP, 2021), [56]	1) Бензилбензоат/5/1.3–2.1)/комнатная температура (–)/1.118 2) Ртуть/5/1.4–2.2/комнатная температура (–)/13.6	Вода/1/комнатная температура/нет данных	1) Изучалось влияние захвата воздуха на дробление струи расплава. 2) Воздуха захватывается больше струей расплава, имеющего меньшую плотность. 3) Наличие воздуха около струи снижает развитие неустойчивости, что приводит к увеличению длины распада. 4) Предложена новая корреляция на основе корреляции Эпштейна–Фауске, учитывающая влияние захваченного воздуха
TIMELCO (KHP, 2020), [57]	Олово/25/5/660–690 (428–458)/7.29	Вода/1/26–72/1	1) Изучалось влияние кипения на дробление струи расплава. 2) Наблюдались три режима: устойчивое пленочное кипение, неустойчивое пленочное кипение и пузырьковое/переходное кипение. 3) Кипение сильно влияет на длину распада струи; изменение от устойчивого пленочного кипения до пузырькового/переходного кипения сильно уменьшает длину распада. 4) Средний размер фрагментов 6–8 мм хорошо коррелирует с теорией Кельвина–Гельмгольца с учетом того, что поверхность струи омывается высокоскоростным потоком пара
Национальный ядерный центр, (Казахстан, 2016), [58]	Оксид алюминия/40–63/6–9/2200 (128)/3.95	Натрий/3.5/400/1.3	1) Средний размер фрагментов – 0.3 мм, что соизмеримо со значениями по теории Кельвина–Гельмгольца. Однако в эксперименте размер фрагментов не зависел от числа Вебера. 2) Длина распада струи на 60–70% ниже значений, которые дает корреляция Саито. Сделано предположение, что на процесс дробления струи влияют не только гидродинамические факторы, но и тепловое взаимодействие, ускоряющее дробление

Таблица 2. Окончание

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Основные результаты
	материал/диаметр струи, мм/скорость, м/с/температура, °C (перегрев, °C)/плотность, г/см^3	вещество/давление, бар/температура, °C/уровень, м	
MELT (Япония, 2016–2021), [59, 60]	1) Алюминий/20/нет данных/1200 (540)/2.7 2) Сталь/<50/нет данных/1700 (273)/7.9	Натрий/3.5/ 300–400/1	Алюминий: 1) Средний размер фрагментов – 2 мм. 2) Длина фрагментации ~100 мм. 3) Длина распада составляет ~10% от значения по корреляции Саито. Сталь: С помощью новой системы визуализации установлена качественная картина дробления струи, в частности, зафиксирована термическая фрагментация струи из-за быстрого вскипания охладителя, захваченного расплавом
MATE (Корея, 2019), [61]	Эвтектика висмут–олово/14–35/3.3–4.2/248–306 (110–168)/8.75	Вода/1/57–99/1.25; 1.5; 1.6	Проведен тщательный анализ неопределенностей, возникающих при определении диаметра струи расплава на входе в воду и длины распада струи. Показано, что тщательное определение этих величин позволяет лучше упорядочить экспериментальные данные. Предложена модификация корреляции Саито
University of Tsukuba (Япония, 2014–2019), [62, 63]	Флюоринерт/3, 5, 7, 10/0.9–3.7/комнатная температура (–)/1.83	Вода/1/комнатная температура/нет данных	Анализировался размер капель, срывающихся с поверхности струи. Предложена корреляция, основанная на рассмотрении срыва гребней волн за счет касательных напряжений (Катаока и др.)
University of Tsukuba (Япония, 2016–2017), [64, 65]	1) Флюоринерт/3, 5, 7, 10/0.03–3.0/комнатная температура (–)/1.68 2) Вода/3, 5, 7, 10/0.03–3.5/комнатная температура (–)/0.997	1) Вода/1/комнатная температура/нет данных 2) силиконовое масло (плотность – 0.76)/1/комнатная температура/нет данных	Изучалось дробление жидкой (более тяжелой) струи в объеме более легкой жидкости. На основе визуальных наблюдений выделены различные режимы дробления: I – варикозный, IIa – волнообразный без срыва капель, IIb – волнообразный со срывом капель, III – распыл. В координатах число Онезорге–число Рейнольдса составлена карта этих режимов

ментации струи – развитие неустойчивости ее поверхности вследствие разности скоростей струи и окружающей среды, который достаточно легко описывать с помощью расчетных кодов. Современные расчетные коды, разрабатываемые для численного моделирования различных стадий парового взрыва, как правило, описывают струю расплава и окружающий ее охладитель отдельными фазами (континуумами), имеющими свои скорости и температуры, что позволяет для произвольного локального участка поверхности струи вычислять характеристики самого быстрорастущего возмущения поверхности и определять параметры образующихся на этом участке фрагментов расплава. Таким образом, можно определять пространственно-временное распределение образующихся в ходе дробления струи фрагментов расплава.

Длина распада струи является интегральным параметром, зависящим от многих факторов в исследуемой системе. Поэтому с точки зрения разработки комплексной математической модели парового взрыва эта величина служит одним из параметров для валидации такой модели и анализа адекватности математических моделей отдельных явлений и процессов при паровом взрыве.

Поскольку перегревы расплавленного кориума при тяжелых авариях на АЭС сравнительно невелики, то особый интерес вызывают исследования фрагментации струй расплава с небольшими перегревами, в частности работа [55]. Быстрое отвердевание расплава при таких перегревах достаточно много изучалось для капель, поскольку теплоотвод на единицу массы расплава в этом случае больше, чем для струи. В [55] были зафиксированы как полная фрагментация струи, так и ее отвердевание. С помощью введения модифицированных чисел Вебера и Стефана, учитывающих начальный перегрев расплава и образующуюся на струе приповерхностную корку, был выполнен перенос полученных результатов на параметры быстрого натриевого реактора и показано, что в этом случае происходит полная фрагментация струи.

В целом же складывается впечатление вторичности многих исследований, представленных в табл. 2, что, с одной стороны, свидетельствует об исчерпанности используемых для исследований методов и подходов, а с другой стороны, говорит о достаточности накопленного уровня знаний для практических приложений.

Выполненные программы экспериментальных исследований крупномасштабных паровых взрывов позволили определить и изучить последовательные стадии развития этого сложного комплексного явления. Были получены уникальные опытные данные для разработки, валидации и усовершенствования математических моделей явлений и процессов, которые реализуются в ходе развития парового взрыва и определяют его закономерности и характеристики. Разработанные при этом многомерные расчетные коды, основанные на методах механики многофазных сред и валидированные на опытных данных выполненных экспериментальных исследований, способны моделировать сложные многомерные неравновесные процессы, сопровождающие паровые взрывы, и выполнять оценки характеристик взрывов.

Отмеченные выше достижения не отменяют необходимости продолжения исследований ввиду исключительной сложности данного явления, связанной с неравновесностью и негомогенностью анализируемых многофазных процессов, когда каждая фаза требует для учета ее вклада в общий процесс введения отдельного поля скорости и отдельного поля температуры. Прежде всего, необходимы углубленные исследования отдельных факторов, существенно влияющих на общее протекание процесса, таких как окисление расплава, его отвердевание, взаимодействие паровой пленки, расплава и охладителя, влияющее на фрагментацию расплава и т.п. Такие исследования не требуют крупномасштабных установок и значительного бюджета.

3. МАЛОМАСШТАБНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВА С ОХЛАДИТЕЛЕМ

3.1. Фрагментация капли расплава. Термическое взаимодействие капли высокотемпературного расплава с охладителем при определенных условиях может протекать взрывным образом, при этом капля дробится на весьма мелкие фрагменты. Образующиеся вследствие локального взрыва волны давления могут послужить триггером для взрыва/фрагментации соседних капель расплава и стать причиной возникновения крупномасштабного парового взрыва. Поэтому исследование термического взаимодействия одиночной капли расплава важно для понимания причин возникновения самопроизвольного крупномасштабного парового взрыва (другой причиной парового взрыва может явиться внешнее воздействие на систему в виде импульса давления, ударной волны и т.п.). Было выполнено довольно много экспериментальных исследований термической фрагментации капли расплава, которые, как правило, сопровождались видеорегистрацией процесса (оптической и рентгенографической), фиксацией возникающих импульсов давления и измерением температуры расплава и охладителя. В ряде случаев оценивались характеристики паровой пленки, возникающей около капли. В табл. 3 приведены краткие сведения об основных экспериментальных программах.

Принципиальная схема указанных выше экспериментов одинакова: капля расплава свободно падает в охладитель, при этом размеры капель вы-

Таблица 3. Основные сведения об экспериментах по дроблению капли расплава

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Триггер	Основные результаты
	материал/масса капли, г/температура, °C	вещество/давление, бар/температура, °C	внешний (давление, МПа)/ спонтанный	
UKAEA (Великобритания, 1975), [66]	Олово/12/300–1000	Вода/1/10–95	Спонтанный	1) Проведено 300 экспериментов, результаты классифицированы по процентной доле фрагментированного металла. 2) Периодические осцилляции парового пузыря с фрагментацией расплава при его схлопывании. 3) При повышении температуры расплава от 400 до 1000°C предельный перегрев воды для спонтанного взрыва снижается от 80 до 50°C
Sandia Nat. Lab. (США, 1982–2005), [67–69]	Оксид железа/6.7/1957	Вода/0.83–12/24–77	Внешний (0.6)	1) Для оксида железа обнаружен минимум необходимого для взрыва давления в инициируемой триггером волне в диапазоне давлений в системе 0.2–0.8 МПа. 2) В опытах с алюминием и его сплавами спонтанных паровых взрывов не наблюдалось. 3) При 1500°C один из опытов привел к неожиданно сильному взрыву со свечением, по всей вероятности связанному с воспламенением алюминия
	Алюминий, сплав Al–Li/1–10/1000–1800	Вода/0.83–0.88/20–25	Внешний (плоские и сходящиеся ударные волны)	
	Металлический кремний/0.8–1.0/1410	Вода/1/8, 20, 80	Внешний (удар импактора по стальному корпусу сосуда)	1) Спонтанных паровых взрывов не наблюдалось для обоих материалов. 2) Триггеринг вызывал паровой взрыв капель расплавов, минимальное давление в создаваемой волне, необходимое для взрыва, равно 2.1 МПа для расплава кремния, 0.6 МПа для ферросилиция. 3) Проведены измерения генерации водорода при окислении кремния водяным паром: для кремния – 2–3 мл при грубой фрагментации и 5 мл при паровом взрыве, для ферросилиция – 0.2 мл при отвердевании и 2–4 мл при взрыве
	Ферросилиций FeSi75 (75% Si масс.)/1.34/1320	Вода/1/20		

Таблица 3. Продолжение

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Триггер	Основные результаты
	материал/масса капли, г/температура, °C	вещество/давление, бар/температура, °C	внешний (давление, МПа)/ спонтанный	
McGill Univ. (Канада, 1994), [70]	Олово/0.5/300–1000 Сплав Cerrolow (темп. плавления – 49°C)/0.5/300–1000	Вода/1/60–65	Внешний (10)	1) Скоростная видео-, киносъемка с частотой кадров до 25000 кадр/с одновременно с рентгеновской съемкой. 2) Эксперименты при низких температурах (для сплава Cerrolow) и высоких температурах (олово и Cerrolow), изучено влияние скорости потока на фрагментацию капли расплава. Получены времена первичного и вторичного схлопывания парового пузырька, показано образование всплесков расплава с поверхности капли. 3) Скорость потока существенно влияет на взаимодействие расплава с водой. При скоростях ~40 м/с коллапса пузырька не происходит, он приобретает выраженную асимметричную форму и контакт расплава с водой происходит в лобовой части капли
SIGMA-2000 (США, 1999), [71]	Сталь/1/1550–1650	Вода/68–265/20 Вода с газом (об. доля 0.06)/265/20	Внешний (ударная волна)	1) Высокоскоростная киносъемка с частотой кадров до 50000 кадр/с одновременно с рентгеновской съемкой. 2) Эксперименты проводились в гидродинамической ударной волне в чистой воде и воде с пузырьками газа. Отличительная черта экспериментов – высокие давления и скорости потока. 3) При низких давлениях расплав был фрагментирован в мелкие дебрисы субмиллиметрового размера, половина дебрисов размером <200 мкм. При высоких давлениях дебрисы имели больший размер (порядка миллиметра), но были пористыми

Таблица 3. Продолжение

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Триггер	Основные результаты
	материал/масса капли, г/температура, °C	вещество/давление, бар/температура, °C	внешний (давление, МПа)/ спонтанный	
Univ. Tsukuba (Япония, 2002), [72]	Олово/5/400–680 Свинец/5/400–530 Цинк/5/420–650 Алюминий/5/660–950	Вода/1/30–70	Внешний (0.3, 0.5)	1) Высокоскоростная киносъемка с частотой кадров до 40500 кадр/с. 2) Получены временные диаграммы давления, демонстрирующие два выраженных пика давления (триггер и взрыв). Для экспериментов со свинцом паровой взрыв не наблюдался. Наибольшее пиковое давление взрыва 0.8 МПа наблюдалось для системы алюминий–вода при инициирующем давлении 0.5 МПа. 3) Для каждого материала определены границы области взрыва на плоскости температура расплава–температура воды
Oyama Nat. Coll. Tech (Япония, 2008), [73]	Олово/1–4/630–650	Вода/1/20	Спонтанный	1) Высокоскоростная киносъемка с частотой кадров до 8000 кадр/с. 2) Как правило, спонтанное инициирование происходило после трансформации изначально сферической капли в грибовидную на краю капли расплава. После коллапса парового пузыря происходила быстрая фрагментация расплава. 3) Мелкомасштабные всплески расплава на поверхности капли не приводят к спонтанным паровым взрывам. Прямой контакт воды с металлом, вызывающий затвердение поверхности, также необязательно приводит к взрыву, паровая пленка может восстанавливаться. Спонтанные паровые взрывы инициируются либо в нижней части капли, либо на ее краю сбоку

Таблица 3. Окончание

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Триггер	Основные результаты
	материал/масса капли, г/температура, °C	вещество/давление, бар/температура, °C	внешний (давление, МПа)/ спонтанный	
KAUST (Сауд. Аравия, 2016), [74]	Олово/5/250–550 Сплав Филдса/5/ 250–550	Вода/1/20	Спонтанный	1) Высокоскоростная киносъемка с частотой кадров до 50000 кадр/с. 2) Для олова (температура плавления – 230ºC) паровой взрыв наблюдался при температурах >350°C, для сплава Филдса (температура плавления – 60°C) при температурах >400°C. 3) Для олова в результате парового взрыва формировались дебрисы в виде пористого материала, поскольку перегревы расплава невелики. Для сплава Филдса формировалось большое количество мелкодисперсных дебрисов в диапазоне 5–500 мкм
MISTEE (Швеция, 2005–2019), [75–80]	Олово/0.5–0.7/1000 WO_3–CaO/0.84–1.5/ 1235–1335 WO_3–Bi_2O_3/1.2–8/1300 WO_3–ZrO_2/0.9–1/1231 Оксид алюминия/1/2071–2265 Цирконий/2/2005	Вода/1/20–80	Спонтанный, Внешний (0.15)	1) Большая серия экспериментов с одновременной фиксацией процесса при помощи видеосъемки (до 100000 кадр/с) и рентгеновской съемки (до 8000 кадр/с). 2) Паровой взрыв происходит после трех колебаний парового пузыря, в ходе которых наблюдаются сильные возмущения расплава. 3) Для бинарных смесей оксидов обнаружена зависимость энергетики взрыва от состава, максимальный коэффициент конверсии достигается для эвтектики. 4) Для расплава оксида алюминия получены более высокие значения коэффициента конверсии (0.3–0.7%), чем для низкотемпературных композиций; динамический пик давления достигал 0.5–1 МПа. 5) Для циркония спонтанные взрывы не наблюдались вследствие генерации неконденсирующегося газа (водорода) при окислении водяным паром

бираются достаточно малыми для предотвращения дополнительного дробления капель при ударе о поверхность жидкости и, как правило, не превышают нескольких миллиметров. Параметрами, изменяемыми в экспериментах, обычно являются температуры расплава и охладителя, внешнее давление, высота, с которой падают капли (скорость входа в охладитель). Исследуются как самопроизвольные паровые взрывы, так и взрывы, индуцированные внешним источником ударной волны. В качестве регистрирующих устройств используются датчики давления жидкой и газовых фаз, а также высокоскоростные видеокамеры и рентгеновская съемка.

В экспериментах наблюдалась качественно примерно одинаковая картина дробления капли расплава в охладителе. В качестве примера можно привести данные, полученные на установке MISTEE [81]. Использовалась видеосъемка, позволяющая наблюдать эволюцию паровой пленки вокруг падающей капли, а также съемка в рентгеновских лучах для регистрации фрагментации капли. После входа капли в воду на ее поверхности возникает паровая пленка, которая затем дестабилизируется под действием внешней волны давления. Из-за возникшего контакта воды с расплавом на части поверхности капли в течение примерно 3.1 мс расплав “разбухает”, а паровая пленка растет, при этом пар охлаждается в недогретой до температуры насыщения воде. После этого расширившийся паровой объем быстро в течение ~0.9 мс схлопывается, что приводит к контакту воды с расплавом на всей поверхности капли. Далее процесс вскипания воды повторяется, однако, в отличие от первого цикла, наряду с ростом основного пузыря вокруг центра капли происходят микровзрывы и рост паровых пузырей вокруг мелких фрагментов, возникших после предыдущего цикла. Мелкие пузыри затем сливаются с основным в единую растущую паровую область значительно большего диаметра, чем в первом цикле. Соответственно, коллапс этой области приводит к еще большему воздействию на каплю. Обычно полное разрушение капли происходит за 2–3 цикла.

На основе подобного рода визуальных наблюдений в [66, 82–85] фрагментация расплава связывается с возникновением при схлопывании паровых полостей холодных водяных струй окружающей жидкости. Эти струи проникают в горячую каплю и взрывным образом вскипают в ней, что приводит к дроблению горячей жидкости. Для каждой стадии процесса (коллапс пленки, образование струй, проникновение струй в расплав и их захват, взрывное испарение жидкости, попавшей в расплав) были предложены относительно простые способы их описания. Сравнение расчетов по этой модели с результатами экспериментов показало приемлемое совпадение, однако ряд параметров модели требует настройки. В [86] феноменология протекающих процессов интерпретируется несколько по-другому, исследователи не увидели в своих экспериментах высокоскоростных водяных струй и предположили, что вследствие схлопывания паровой пленки возникают возмущения поверхности капли расплава, которые приводят к возникновению прямого контакта расплав–вода, который обеспечивает дальнейшую фрагментацию капли. Детальные исследования процесса фрагментации и характера фрагментов взрыва капли [87], проведенные в том числе и с применением электронного микроскопа, показали, что процесс фрагментации на определенном этапе можно интерпретировать как в [86], но в целом схема фрагментации ближе к предложенной в [66, 82–85], в частности, на поверхности фрагментов были зафиксированы следы воздействия микроструй воды.

Авторы недавней работы [88], обсуждая механизмы тонкой фрагментации горячего расплава в холодной воде, обращают внимание на по их мнению незаслуженно забытую кавитационно-акустическую модель дробления [89]. Согласно этой модели, при вскипании охладителя на поверхности горячей жидкометаллической капли вследствие роста и схлопывания паровых пузырей генерируются высокоинтенсивные звуковые или ударные волны. Эти волны распространяются в том числе и в объеме капли, а их отражение изнутри от ее поверхности приводит к возникновению в расплаве череды импульсов разрежения. Подобные импульсы отрицательного давления по своей амплитуде и длительности могут достигать значений, достаточных для возникновения кавитационных полостей внутри капли горячего теплоносителя и ее фрагментации при их схлопывании. В [88] экспериментально показано существование акустических знакопеременных волн, генерируемых при взрывном росте пузырей на горячей поверхности, которые распространяются в твердом теле, моделирующем каплю расплава. Действительно, на наш взгляд, эта модель вполне имеет право на существование, однако некоторые моменты нуждаются в уточнении. Пороговое давление, при котором возможно возникновение кавитационных пузырьков, согласно [89], для жидких металлов огромное ~10^3 МПа. Это давление значительно снижается до ~1 МПа, только если допустить существование в металле примесей или растворенных газов. Следующий вопрос связан с тем, что даже если допустить, что пузырек может зародиться, то надо обосновать, что он способен расти в условиях знакопеременного поля давления, т.е. скорость роста должна превышать скорость сжатия пузырька с тем, чтобы пузырек достиг значительных размеров и смог вызвать фрагментацию. Также следует отметит, что кавитационно-акустическая модель не противоречит модели проникновения струй, а естественным образом дополняет. Очевидно, что в процессе цикличе-

ской фрагментации капли расплава всегда присутствуют осцилляции давления, в том числе и внутри капли. Если условия для возникновения и роста кавитационных пузырьков внутри капли будут соблюдены, то это будет способствовать фрагментации, при этом поверхность капли будет подвергаться воздействию водяных струй.

Результаты экспериментов по фрагментации капли расплава в охладителе, как правило, представляют на координатной плоскости – начальные температуры расплава и охладителя – с целью определить так называемую зону взрывного взаимодействия (ЗВВ), вне этой зоны капли медленно охлаждаются без фрагментации. На рис. 6 показана характерная карта режимов взаимодействия, полученная в [66] и подтвержденная впоследствии другими экспериментами. Левая вертикальная граница ЗВВ определяется так называемой температурой гомогенного зародышеобразования, выше которой начинается быстрое образование пузырьков в перегретом слое охладителя вблизи поверхности расплава, приводящее к локальному повышению давления и возникновению ударной волны. Для воды эта величина составляет около 300°С. Наклонная граница ЗВВ отделяет область устойчивого пленочного кипения, в которой расплав медленно охлаждается и фрагментации капли не происходит, от области, в которой пленочное кипение дестабилизируется и реализуются режимы с более интенсивным теплообменом (переходное кипение, неустойчивое пленочное кипение), характеризующиеся возникновением локальных прямых контактов расплава с охладителем и фрагментацией капли. Хорошо видно, что взрывное взаимодействие наблюдается только при значениях недогрева жидкости более 20°С.

3.2. Неустойчивое пленочное кипение. Представленные выше результаты свидетельствуют о важности изучения закономерностей пленочного кипения на горячей капле расплава, погруженной в недогретую до температуры насыщения жидкость. Важные сведения о пленочном кипении, проливающие свет в том числе и на механизм фрагментации расплава, можно получить с помощью анализа более простой ситуации, когда капля расплава заменяется горячей металлической сферой или цилиндром. Несмотря на то, что сам процесс фрагментации исключается при этом из рассмотрения, сохраняются многие существенные тепловые и гидродинамические характеристики взаимодействия охладителя с горячим расплавом. Использование металлической сферы дает возможность установить термопары как внутри сферы, так и на ее поверхности, что позволяет фиксировать характеристики теплообмена охладителя с горячей поверхностью.

Экспериментов по пленочному кипению на сферах на сегодняшний день выполнено достаточно много, в этой статье затронуты исследования, касающиеся широко обсуждаемой в последние годы темы, связанной с потенциальной возможностью прямого контакта охлаждающей жидкости с поверхностями, имеющими температуру выше температуры предельного перегрева, и его влияния на процесс фрагментации расплава, а также работы, в которых изучалось взрывное разрушение паровой пленки. В табл. 4 приведены основные сведения об экспериментах, в той или иной мере относящиеся к упомянутым выше вопросам.

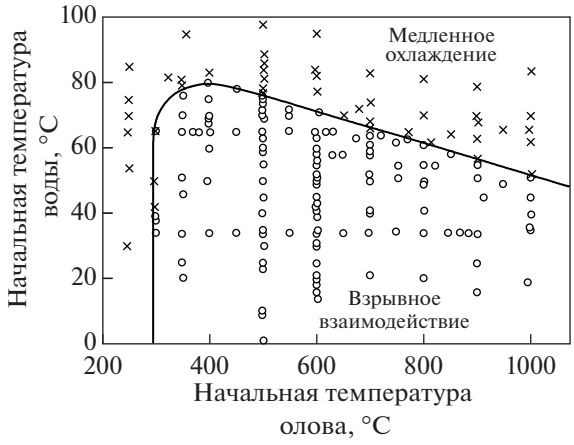

Рис. 6. Результаты экспериментов [66] по взаимодействию капли олова с водой.

Достаточно давно [94] было экспериментально установлено, что при пленочном кипении воды при достаточно больших недогревах до температуры насыщения (>20°С для атмосферного давления) возникает режим интенсивного охлаждения (другие распространенные названия этого режима “микропузырьковое кипение” или “неустойчивое пленочное кипение”), при котором характерные плотности теплового потока составляют 1–10 МВт/м^2, что на порядок выше, чем при устойчивом пленочном кипении насыщенной/слабо недогретой жидкости. Несмотря на очевидную важность этого явления для многочисленных технических приложений должного внимания исследованию фундаментальных механизмов неустойчивого нестационарного пленочного кипения до недавнего времени не уделялось. Лишь чуть более 10 лет назад на кафедре инженерной теплофизики МЭИ под руководством профессора В.В. Ягова были развернуты систематические экспериментальные и теоретические исследования пленочного кипения недогретых жидкостей [110–125].

Основные результаты, полученные этой научной группой, состоят в следующем. В широком диапазоне параметров были проведены экспериментальные исследования охлаждения металлических шаров в воде и других жидкостях (см. табл. 4).

Таблица 4. Основные сведения об экспериментах с нагретыми сферами/цилиндрами

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Основные результаты
	форма/материал/диаметр, см/температура, °C	вещество/давление, бар/недогрев, K/скорость, м/с	
University of California (США, 1954–1957), [90, 91]	Цилиндр/графит/0.98, 1.26, 1.62/350–1300	Бензол, тетрахлорметан, этанол, гексан/1/11–44/0.9–4	Установлено, что коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении заметно возрастает при увеличении недогрева жидкости и при определенных условиях сопоставим со значениями коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении
Argonne National Laboratory (США, 1971), [92, 93]	Сфера/тантал/2.54, 1.905, 1.27/1529–2360	Натрий/1/8–683/0	Проведено 23 успешных эксперимента по охлаждению неподвижной горячей сферы в жидком натрии. Построены кривые кипения, включающие в себя режимы устойчивого пленочного кипения, переходного и пузырькового. Наибольшее влияние оказывает значение недогрева натрия до температуры насыщения, по мере увеличения недогрева кривые кипения сдвигаются в сторону больших тепловых потоков и больших температурных напоров
Technion, Imperial College, Oxford University (Израиль–Великобритания, 1990), [94]	Сфера/медь с никелевым покрытием/0.16–0.32/150–720	Вода/1/0–40/1.6–2.7	Изучалось пленочное кипение при падении медных шаров в воде. При недогреве воды >20 K наблюдались дестабилизация паровой пленки и возникновение микропузырькового кипения, при котором интенсивность теплообмена значительно выше по сравнению с пленочным кипением насыщенной жидкости
Kyushu University (Япония, 1992–1995), [95, 96]	Цилиндр/платина/0.3–0.5/600–1400	Вода/1/50–100/0.1–1.5	Горячая платиновая проволока с постоянной скоростью опускалась в воду. Получены кривые кипения, включающие в себя режимы пленочного кипения, переходного и пузырькового. Наблюдались два подрежима пленочного кипения: устойчивое и неустойчивое. Существованию устойчивого пленочного кипения способствуют высокая температура проволоки, малые недогревы, низкие скорости и малые диаметры

Таблица 4. Продолжение

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Основные результаты
	форма/материал/диаметр, см/температура, °C	вещество/давление, бар/недогрев, K/скорость, м/с	
University of California (США, 1996), [97])	Сфера/сталь, латунь/ 0.6–1.9/573–1273	Вода/1/0–40/0–2.3	1) В широком диапазоне параметров проведены эксперименты по пленочному кипению воды на сферах. 2) Выполнены эксперименты по пленочному кипению двухфазного потока на сфере, объемное паросодержание 0.2–0.65 (подъемное течение) и 0.7–0.95 (опускное). 3) Экспериментальные результаты легли в основу разработанной авторами корреляции для коэффициента теплообмена
CEA (Франция, 2009), [98]	Цилиндр/вольфрам/ 0.001–0.25/1080–2630	Вода/1–210/0–350/0.2–46	Изучалось пленочное кипение на тонких раскаленных проволоках, охлаждаемых потоком воды. Из-за ограничений экспериментальной установки длительность процесса составляла несколько миллисекунд, после этого начиналось влияние теплоотвода через боковые электроды. Во всех экспериментах наблюдалось устойчивое пленочное кипение. Тепловой поток увеличивается: 1) с ростом температуры проволоки, 2) возрастанием недогрева, 3) уменьшением диаметра проволоки и 4) увеличением скорости жидкости. В диапазоне 100–200 бар давление слабо влияет на процесс, заметное увеличение теплового потока наблюдается в диапазоне 1–5 бар
Granfield University (Великобритания, 2012), [99]	Сфера/медь, алюминий, сталь/1.6, 3.2/600	Вода/1/0–40/0	Установлено, что выше определенной степени недогрева паровая пленка разрушается взрывным образом, после чего начинается интенсивное охлаждение сферы. Для алюминиевой сферы диаметром 32 мм получена “двугорбая” зависимость, свидетельствующая о наличии двух подрежимов пленочного кипения: устойчивого и неустойчивого

Таблица 4. Окончание

Эксперименты	Расплав	Охладитель	Основные результаты
	форма/материал/диаметр, см/температура, °C	вещество/давление, бар/недогрев, K/скорость, м/с	
School of Energy (Китай, 2020), [100]	Сфера/сталь/0.3/800	Вода/1/35.6–63.9/0.035–0.098	Изучался процесс разрушения (схода) паровой пленки в условиях вынужденной конвекции. На поверхности сферы устанавливались три термопары, помимо этого велась видеофиксация процесса. Скорость разрушения пленки увеличивается с ростом недогрева
ОИВТ РАН (2001–2015), [101–109]	Полусфера/сталь, медь, латунь/0.3–2/300–700	Вода/1/5–85/0	Изучался процесс взрывного разрушения паровой пленки. При недогревах воды менее ~20°C имеют место стабильные колебания паровой пленки. При меньших температурах воды разрушение пленки происходит взрывным образом
ИТФ НИУ “МЭИ” (2009–2021), [110–125]	Сфера/сталь, медь, никель/3–5.1/450–750	Вода/1–10/10–170/0	Доказано возникновение интенсивного режима пленочного кипения для всех материалов сферы и при всех давлениях. Характерные плотности теплового потока в этом режиме – 3–10 МВт/м^2. Необходимое условие – наличие недогрева более 25 K
		Изопропанол/1–10/82–160/0	Режим неустойчивого пленочного кипения не возникает даже при высоких недогревах во всем изученном диапазоне давлений
		Этанол/1–10/33–153/0	
		Перфторгексан/1–10/70–130/0	
		Смесь воды и изопропанола различной концентрации/1/50/0	Режимы интенсивного пленочного кипения наблюдаются лишь при массовых концентрациях изопропанола <50%. Плотности теплового потока – 2.5–5 МВт/м^2

В насыщенной или слабо недогретой воде процесс охлаждения от начальной однородной температуры 700–800°C проходит в основном в режиме устойчивого пленочного кипения. При недогревах воды выше 25 K наблюдаются режимы интенсивного теплообмена, которые начинаются, когда температура поверхности намного превышает критическую. Охлаждение в неводных жидкостях (этанол, изопропанол, перфторгексан) даже при самых больших недогревах протекало в режиме устойчивого пленочного кипения.

На основе анализа режимов охлаждения образцов из разных металлов и сопоставления со стационарным пленочным кипением в потоке недогретой воды был сделан вывод о том, что режимы интенсивного теплообмена характерны только для нестационарных процессов пленочного кипения. В этом случае тепловой поток к области поверхности охлаждаемого тела, в которой возникает контакт с жидкостью, определяется тепловой активностью материала и характерным температурным напором. Сами локальные контакты обусловлены наличием выступов на твердой поверхности и волновым свободноконвективным движением недогретой жидкости на границе с паровой пленкой. На границе жидкости, контактирующей с горячей поверхностью, т.е. на линии контакта трех фаз, происходит испарение с огромной интенсивностью. На основе оценки баланса тепловых потоков, один из которых подводится к зоне интенсивного охлаждения, а другой отводится от нее, в [119, 120] было получено выражение для расчета температуры поверхности шара, при которой начинается режим интенсивного пленочного кипения. При этом характерный масштаб времени (период колебаний волн) определялся из анализа свободноконвективного течения недогретой жидкости на границе с паровой пленкой и результатов известного решения П.Л. Капицы задачи о волновом течении гравитационной пленки. Показано, что расчетные температуры перехода находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными значениями (±30%). Полученный авторами критерий позволил в том числе прояснить влияние теплофизических свойств жидкости на возможность возникновения перехода в режим интенсивного пленочного кипения. Скорость охлаждения выступа в основном определяется произведением двух параметров: теплоты парообразования и поверхностного натяжения. Значение этой величины для воды намного превосходит аналогичные параметры для спиртов и особенно перфторгексана, что объясняет отсутствие режима интенсивного пленочного кипения в этих жидкостях в отличие от воды.

В недавней работе [124] представлена корректировка модели [119, 120], необходимая из-за того, что учет в ней свободной конвекции недогретой жидкости на границе с паровой пленкой не дает правильной оценки влияния недогрева на условия перехода к режиму интенсивного теплообмена, кроме того, в модели не учитывается шероховатость охлаждающей поверхности. Детали корректировки не излагаются, однако приводится общая форма уравнения для перегрева поверхности, соответствующего началу режима интенсивного теплообмена, в которую входит в том числе высота неровностей поверхности и неопределенный коэффициент, который, видимо, надо определять из сравнения с экспериментами.

Следует отметить, что определение условий возникновения режима интенсивного пленочного кипения безусловно важно для анализа фрагментации высокотемпературного расплава в охладителе. Однако для обоснованного применения модели, разработанной для неподвижной металлической сферы, к процессам термического взаимодействия расплава с водой эта модель требует, на наш взгляд, учета дополнительных факторов. Во-первых, капли расплава, как правило, движутся относительно охладителя, поэтому модель должна учитывать не только движение, вызванное свободной конвекцией, но и вынужденной конвекцией тоже. Во-вторых, поверхность капли нельзя рассматривать как твердую поверхность, на которой имеются выступы. Вероятно, на поверхности капли будут возникать волны (аналог твердых выступов), что также требует корректного учета в модели.

Вопросы неустойчивого пленочного кипения затрагиваются в работах французских и японских ученых. При анализе собственных экспериментов TREPAM [98], в которых всегда наблюдалось устойчивое пленочное кипение, авторы провели сопоставление с данными близких по постановке экспериментов японских исследователей [95, 96], в которых было получено два подрежима пленочного кипения: устойчивое (низкий тепловой поток) и неустойчивое (высокий тепловой поток). Отсутствие режима неустойчивого пленочного кипения в экспериментах TREPAM объясняется тем, что из-за ограничений экспериментальной установки длительность процесса составляла несколько миллисекунд, после этого начиналось сказываться искажающее влияние теплоотвода через боковые электроды, поэтому кривых кипения вплоть до полного охлаждения проволоки получено не было, а был зафиксирован только начальный этап охлаждения, характеризующийся наличием устойчивой паровой пленки. В [95, 96] процесс изучался до полного охлаждения проволоки. В качестве возможной причины возникновения неустойчивого пленочного кипения в [95, 96] указывается, что при развитии неустойчивости на межфазной границе жидкость–пар появляются периодические контакты жидкости с поверхностью, усиливающие теплообмен. В последующем был проведен анализ устойчивости

пленочного кипения к возникающим стоячим волнам на поверхности жидкость–пар [126], который позволил определить критическую толщину пленки, ниже которой начинается неустойчивость.

В [127] была разработана модель пленочного кипения, учитывающая высокий перегрев поверхности цилиндра, и подтверждена хорошими результатами сравнения с экспериментами TREPAM [98], в которых использовалась проволока с очень высокой температурой. Однако анализ экспериментов [95, 96] с меньшей температурой поверхности проволоки показал, что модель хорошо описывает область устойчивого пленочного кипения, но сильно занижает тепловой поток в области неустойчивого пленочного кипения. Тем самым еще раз косвенно подтверждается факт, что при неустойчивом пленочном кипении существует дополнительный механизм теплопередачи, отличный от "классического" пленочного кипения. Авторы также выполнили анализ экспериментов [90, 91, 97] с использованием своей модели и достаточно убедительно показали, что в экспериментах [90, 91] имели место два подрежима пленочного кипения: устойчивый и неустойчивый, а в экспериментах [97] во всех опытах реализовывалось неустойчивое пленочное кипение.

Интересный анализ старых экспериментов [92, 93] по исследованию пленочного кипения натрия на сфере приведен в [128]. Авторы сумели получить доступ к исходным экспериментальным данным и установили, что в [92, 93] приводятся сглаженные кривые кипения, в то время как кривые кипения, построенные по исходным экспериментальным данным, свидетельствуют о наличии как режима устойчивого пленочного кипения, так и режима неустойчивого пленочного кипения.

В [128] был предложен критерий перехода между режимами устойчивого и неустойчивого пленочного кипения на основе довольно простого подхода, при котором приближенно оценивается толщина пленки в зависимости от недогрева жидкости для различных температур сферы и полагается, что переход происходит при некоторой условной смене "толстой" пленки на "тонкую" (неустойчивую). Применение этого критерия к экспериментам [66] и [92, 93] показало довольно неплохие предсказательные возможности этого критерия. В [129] предложена комбинация из нескольких полуэмпирических корреляций для числа Нуссельта, позволяющая учитывать два режима теплообмена при пленочном кипении: устойчивый и неустойчивый.

Таким образом, можно констатировать, что в отличие от работ В.В. Ягова с соавторами, направленных на изучение фундаментальных характеристик неустойчивого пленочного кипения и создание модели явления исходя из анализа теплофизических и гидродинамических процессов, в работах зарубежных ученых превалирует более практический подход, при котором основной целью является получение полуэмпирических корреляций для числа Нуссельта без углубления в конкретные механизмы процесса.

В цикле работ сотрудников ОИВТ РАН – МЭИ [101–109] выполнены экспериментальные исследования, направленные на выяснение в конечном счете причин фрагментации капли расплава. Однако подавляющее большинство экспериментов было выполнено с использованием твердой нагретой полусферы. Авторы объясняют это тем, что в отличие от экспериментов с каплями жидкого металла эксперименты с твердотельной нагретой поверхностью более просты в проведении и условия их проведения намного лучше контролируются, тем самым выше повторяемость результатов. Были изучены локальные тепловые и гидродинамические процессы, протекающие при смене режимов кипения на горячих поверхностях.

Экспериментально показано, что при малых (менее ~20°C) недогревах воды до температуры насыщения имеют место стабильные низкочастотные колебания поверхности раздела "паровая пленка–жидкость". Эти колебания не приводят к контакту жидкости с греющей поверхностью, поскольку одновременно существенно возрастает толщина пленки. Из этого результата делается вполне обоснованное предположение, что отсутствие фрагментации капель при малых недогревах охладителя связано с увеличением толщины парового слоя, исключающим контакт холодной жидкости с каплей.

Показано, что взрывному сходу паровой пленки предшествует прямой контакт жидкости с греющей поверхностью, после которого с выдержкой в несколько десятков микросекунд возникает импульс (пакет импульсов) давления. В течение этой временной задержки происходит прогрев тонкого пристенного слоя жидкости до температуры предельного перегрева (кинетический переход в метастабильное состояние) и его гомогенное взрывное вскипание.

Важным, на наш взгляд, результатом является определение влияния окислов на поверхности на характер разрушения пленки, поскольку поверхность капли расплавленного металла, как правило, является окисленной. Было установлено, что для поверхностей без окислов или с толстым (несколько мкм и выше) малотеплопроводным покрытием характерен спокойный переход от пленочного кипения к пузырьковому. На слабо окисленных поверхностях или поверхностях с тонким (менее 1 мкм) малотеплопроводным покрытием имеет место взрывное разрушение паровой обо-

лочки, сопровождающееся выбросом струй и значительными импульсами давления.

Важно отметить, что полученные экспериментальные данные стимулировали углубленное исследование вопросов, связанных с изучением образования волн на межфазной границе, динамики и устойчивости парового слоя [130–135]. Основной результат, полученный в этих работах, состоит в обнаружении волн нового типа, развивающихся на межфазной поверхности при воздействии стационарного теплового потока. Показано, что основное влияние на волновые процессы на границе раздела фаз оказывает явление, связанное с тем, что деформация фазовой поверхности при наличии потока теплоты приводит к изменению температуры кипения и зависящего от нее давления насыщения. Вариации температуры кипения и давления насыщения приводят к генерации поверхностных волн, которые отличаются от известных гравитационно-капиллярных волн. Фазовая скорость этих волн при интенсивных потоках теплоты может намного превышать скорость капиллярно-гравитационных волн и приводить к возникновению “ряби”, не связанной с поверхностным натяжением. Эти явления играют определяющую роль в волновых процессах на границе раздела жидкости и ее пара. В работе [136] проведенный вейвлет-анализ экспериментальных данных показал, что периодические колебания электрического сопротивления, связанные с колебаниями пленки пара, могут быть вызваны волнами этого типа.

3.3. Обсуждение. Если не вдаваться в неизбежные детали и индивидуальные особенности рассмотренных исследований термической фрагментации капли расплава, находящейся при пленочном кипении в жидком охладителе, то в качестве обобщающего вывода можно утверждать, что фрагментация начинается в результате кратковременного прямого контакта охладителя и расплава (в той или иной форме), который вызывает последующие динамические процессы в капле и ее близлежащей окрестности, приводящие в конечном итоге к ее дроблению на отдельные фрагменты.

Углубленные исследования физики неустойчивого пленочного кипения – процесса, определяющего в том числе и возможную фрагментацию капли расплава, привели к формированию новых представлений о данном режиме кипения, при этом уже сформулирована качественная картина процесса и разрабатывается его количественное описание.

Отдавая важность разработке и совершенствованию фундаментальных представлений о процессе термической фрагментации капли расплава, отметим, что с точки зрения приложений, связанных с анализом безопасности АЭС и требующих анализа последствий крупномасштабных паровых взрывов, всегда постулируется некое триггерное событие, инициирующее последующую волну термической детонации. В самой же мощной волне у капли расплава, попадающей в область высокого давления, паровая пленка схлопывается, и капля дробится высокоскоростным потоком охладителя по механизму обдирки, который достаточно хорошо изучен.

4. ВЛИЯНИЕ ОТВЕРДЕВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ РАСПЛАВА НА ТЕРМИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВА С ОХЛАДИТЕЛЕМ

4.1. Эксперименты по изучению отвердевания поверхности расплава. В табл. 5 приведены основные сведения об экспериментах, посвященных исследованию влияния отвердевания поверхности расплава на фрагментацию.

4.2. Теоретические модели отвердевания поверхности расплава. Сначала остановимся на работах, в которых изучалась неустойчивость поверхности раздела двух сред с учетом ее возможного отвердевания. Подход к исследованию этой проблемы был заложен в [150]. Была рассмотрена линейная задача об устойчивости двух полубесконечных жидкостей, разделенных тонкой упругой перегородкой (твердая корка) и находящихся в поле силы тяжести. Были определены характерные времена разрушения и длины волн, при которых начинается неустойчивость. Показано, что полученные теоретические результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В [151] предложена приближенная теория нелинейного роста наиболее быстрорастущей длины волны (согласно линейной теории) на первоначально плоской поверхности. Амплитуда определялась энергетическим методом с использованием квазилагранжевой системы координат в условиях затвердевания и без него. Было получено выражение для критической толщины корки затвердевающей капли, при толщинах больше критического значения рост неустойчивости невозможен.

В [142] выполнен линейный анализ устойчивости затвердевшей поверхности, близкий к [150]. Рассматривались две жидкости, движущиеся друг относительно друга (обобщение задачи Кельвина–Гельмгольца), на границе раздела которых располагается упругая затвердевшая корка. Был определен критический модифицированный критерий аэроупругости, равный 20 000, при превышении которого фрагментация капли происходит даже при наличии корки, а при значениях этого критерия меньше критического фрагментации не происходит.

В обзоре [41] подробно изложены результаты работ его авторов по исследованию неустойчивости струи расплава в охладителе, поверхность ко-

Таблица 5. Эксперименты по исследованию отвердевания расплава

Организация/ссылки	Расплав/охладитель	Тип и параметры экспериментов	Основные результаты
IKE (Штутгарт, Германия, 1985–1986), [137, 138]	Металл Вуда/вода	Впрыск капли в движущийся поток воды. Диаметр капли 3.2–5.8 мм; температура расплава 75–160°C; температура воды 10–75°C; скорость воды 0.9–40.7 м/с	Сделано 65 экспериментов. Использовалась высокоскоростная видеосъемка. Толщина твердой корки оценивалась расчетным путем в предположении, что форма капли сферическая и коэффициент теплообмена расплава к воде определяется по формуле для вынужденной конвекции. Найдено, что в случае тонких корок поведение капли такое же, как для полностью жидких капель. Лишь достаточно толстые корки снижают фрагментацию. Переход от тонких к толстым коркам происходит в достаточно узком диапазоне 105–120 мкм. Для тонких корок при скоростях воды <5 м/с происходит грубое дробление капель путем деформации капли, при скоростях <10 м/с – тонкая фрагментация из-за обдирки погранслоя. Для толстых корок при таких скоростях не происходит ни деформации, ни дробления капель. Локальное разрушение капель с толстой коркой начинает происходить при скоростях >10 м/с, а полное разрушение – при >15 м/с
Northwestern University (США, 1987), [139]	Металл Вуда/вода	Впрыск капли в ударную трубу, заполненную водой. Диаметр капли – 2.3–9.0 мм; температура расплава – 104–125°C; температура воды – 30–50C; паросодержание – 0.8–4.8%; отношение давлений на ударной волне – 7.95–12.42	Изучалось влияние затвердевания поверхности капли расплава на фрагментацию, вызванную воздействием ударной волны. Выполнено 30 экспериментов. Использовалась высокоскоростная видеосъемка. В семи экспериментах капля жидкая и фрагментирована. В остальных 23 экспериментах наблюдалась частично затвердевшая капля, при этом фрагментация капли наблюдалась только в трех экспериментах. Результаты сравнения с теорией неустойчивости Рэлея–Тейлора, учитывающей наличие затвердевания поверхности капли, показали хорошее согласие
JAERI (Япония, 1999), [140]	Цинк, олово/вода	Пролив струи расплавленного цинка (температура 430–470°C) и олова (250–270°C) в недогретую воду (15°C) при атмосферном давлении. Масса расплава – 100 г. Диаметр струи – 6.5 мм	Использовалась высокоскоростная видеосъемка. В экспериментах струя дробилась с образованием крупномасштабных конических структур, в которых в ряде случаев наблюдалось термическое взаимодействие расплава с водой (для цинка достаточно редко, для олова намного чаще). В качестве причины возникновения термического взаимодействия авторы указывают захват воды через отверстия в затвердевшей поверхности струи, приводящий к контакту с жидким расплавом, находящимся в центре струи. Различие в поведении материалов авторы связывают с низким значением кинематической вязкости олова, что дает возможность возникновения большего количества отверстий в твердой корке и большему проникновению воды

Таблица 5. Продолжение

Организация/ссылки	Расплав/охладитель	Тип и параметры экспериментов	Основные результаты
KTH (Швеция, 1998–2001), [141, 142]	Металл Вуда, свинцово-висмутовый сплав/вода	Впрыск капли расплава в недогретую воду при атмосферном давлении. Температура металла Вуда – 85°C, температура сплава Pb–Bi –145–335°C. Температура воды –10–85°C	Выделено два режима фрагментации капли: 1) определяющее влияние затвердевания (крупные фрагменты неправильной формы), 2) влияние затвердевания слабое/отсутствует (несколько крупных фрагментов и множество мелких сферических фрагментов). Установлено сильное замедление фрагментации в сплаве Pb–Bi неэвтектического состава из-за наличия переходной зоны ликвидус–солидус, в которой резко возрастает вязкость. На основе линейного анализа устойчивости получен модифицированный критерий аэроупругости, который хорошо предсказывает режимы фрагментации капли
CRIEPI (Япония, 2002–2010), [143–145]	Медь, серебро/натрий	Три серии экспериментов: 1) впрыск струи расплава в натрий. Масса расплава – 20 г, температура меди – 1100–1280, температура натрия – 280°C, диаметр сопла – 6 мм. 2) Масса меди – 40–300 г, серебра – 50 г. Диаметр струи меди – 6.9–18, серебра – 9.7–17.7 мм. Температура меди – 1099–1249, серебра – 966–1202, натрия – 206–500°C. 3) Масса меди – 20–300 г. Диаметр струи – 7.6–18 мм. Температура расплава – 1095–1249°C. Перегрев расплава – 11–165°C. Температура натрия – 248–300°C. Число Вебера – 5–1534	При числах Вебера <200 (низкие скорости струи) наблюдается термическая фрагментация струи расплавленной меди, поверхность которой затвердела. Причина фрагментации – проникновение натрия внутрь жидкой сердцевины струи благодаря особенностям деформации струи и течения окружающего натрия, быстрое вскипание натрия вызывает рост давления и фрагментацию. Увеличение перегрева расплава относительно температуры плавления приводит к повышению доли более мелких фрагментов. При числах Вебера >200 (высокоскоростные струи) размеры фрагментов не зависят от перегрева расплава, что свидетельствует о переходе от термического к гидродинамическому механизму фрагментации. На основе экспериментальных данных предложена зависимость размера образующихся фрагментов от числа Вебера

Таблица 5. Окончание

Организация/ссылки	Расплав/охладитель	Тип и параметры экспериментов	Основные результаты
Hokkaido University (Япония, 2009–2012), [146–149]	Медь, сталь/натрий	Впрыск капли в натрий. Четыре серии экспериментов: 1) медь. Масса капли – 1–5 г. Диаметр капли – 5.5–10.6 мм. Температура расплава –1084–1718, натрия – 249–314°C. Число Вебера – 52–114. 2) Сталь, медь. Масса капли стали – 1.5–5.2, капли меди – 1–5 г. Температура стали – 1470–1820, меди – 1084–1718°C. Температура натрия – 249–227°C. Число Вебера капли стали – 56–95, капли меди – 52–114. 3) Сталь. Масса капли – 5 г. Диаметр капли – 13–23 мм. Температура расплавленной стали – 1450–1703, натрия – 300–313°C. Число Вебера – 199–586. 4) Медь. Масса капли – 1–5 г. Диаметр капли – 5.6–14.1 мм. Температура расплавленной меди – 1098–1657, натрия – 298–355°C. Число Вебера – 102–614	В целом картина процесса примерно одинаковая и для меди, и для стали. Интенсивная фрагментация капли расплава, даже при температурах контакта двух сред меньше температуры плавления, наблюдается при достаточно больших числах Вебера (>200–250), когда гидродинамические эффекты преобладают над термическими. При высоких числах Вебера или высоких перегревах размеры фрагментов, образующихся при дроблении капель или струй расплава различной массы, имеют близкие значения. При низких числах Вебера или низких перегревах спектр размеров фрагментов намного больше. В зависимости от числа Вебера авторы выделили два механизма фрагментации: гидродинамический и термический. При входе в натрий передняя поверхность капли затвердевает и одновременно начинает замедляться из-за возросшего сопротивления. Если капля имеет большую инерцию (большое число Вебера), то расплавленное ядро капли может пробить эту замедляющуюся переднюю поверхность, покрытую тонкой твердой коркой, и вступить в непосредственный контакт с натрием, при этом происходит фрагментация этой прорвавшейся через корку части расплава из-за роста неустойчивости Рэлея–Тейлора. Если инерция небольшая (малые числа Вебера), то твердая корка на передней части капли сохраняется, а фрагментация происходит по термическому механизму путем попадания микроструй натрия в расплавленную часть капли

торой затвердела. (Оригинальные статьи с этими исследованиями были опубликованы на японском языке.) Подход, который здесь использовался, аналогичен [142, 150]. Показано, что полученная теоретически длина наиболее быстрорастущей волны с учетом затвердевания достаточно неплохо согласуется с экспериментальными данными по размерам фрагментов дробящихся струй расплава.

В серии работ [152–158] разрабатывалась модель затвердевания капель расплава для использования в расчетных кодах, моделирующих процессы парового взрыва. Для описания неравномерного распределения температуры в затвердевающей капле использовался приближенный подход, основанный на разбиении капли на три зоны: 1) жидкое ядро капли, в котором температура сохраняет исходное значение, 2) наружная затвердевшая корка, в которой температура меняется линейно, и 3) промежуточная жидкая область, где температура меняется по параболе от температуры ядра до температуры плавления на границе с твердой коркой. Эти профили температуры сращивались между собой с помощью соответствующих граничных условий. Было принято, что возникающая твердая корка представляет собой упругую оболочку, которая способствует устойчивому существованию капли и препятствует фрагментации. В качестве критерия фрагментации авторы используют число Вебера, при этом если капля жидкая, то в качестве стабилизирующей силы, как обычно, рассматривается поверхностное натяжение, но если поверхность капли затвердевает, то вместо поверхностного натяжения используется стабилизирующая механическая сила образовавшейся твердой оболочки. Модифицированное таким образом число Вебера имеет вид

$$\mathrm{We}^* = \frac{\rho_c v_{\mathrm{rel}}^2 D^3}{E\delta_s^3}\left(1-\mu^2\right),$$

где ρ_c – плотность охладителя, v_{rel} – относительная скорость между каплей и охладителем, D – диаметр капли, E – модуль Юнга, δ_s – толщина корки, μ – коэффициент Пуассона.

На основе анализа экспериментальных данных было установлено, что критическое значение модифицированного числа Вебера находится в диапазоне от 1 до 5. При превышении критического значения происходит фрагментация частично отвердевшей капли.

В ряде работ [159–164] быстрый процесс затвердевания рассматривался не как фактор, стабилизирующий поверхность капли/струи, а, наоборот, как источник возмущений, приводящих к фрагментации. Модели, предложенные в этих работах, предполагают, что в результате разрушения паровой оболочки, расположенной вокруг отдельной капли, происходит интенсивный контакт охладителя с горячей поверхностью. В итоге поверхностный слой расплава быстро остывает и затвердевает, что сопровождается возникновением в нем растягивающих механических напряжений и сильным всесторонним обжатием жидкого ядра капли твердой оболочкой. В результате происходит образование трещин в затвердевшем поверхностном слое и выбросы дробящихся струй горячей жидкости в охладитель. В работах [165–167] исследовалось влияние образующейся на поверхности расплава твердой корки на фрагментацию частиц расплава. Было установлено, что скорость роста корки существенно зависит от свойств материала расплава, в первую очередь таких как температура плавления, теплопроводность и коэффициент поглощения. Сравнительные расчеты для натурного кориума, оксида алюминия и стали показали, что наиболее прочная корка образуется на частицах из натурного кориума, что затрудняет их фрагментацию по сравнению с частицами из оксида алюминия или стали. Этот результат подтверждается экспериментальными данными, упоминавшимися выше, свидетельствующими о плохой взрываемости кориума.

Основной недостаток упомянутых выше предположений состоит в том, что результаты численных оценок, основанных на термомеханических гипотезах дробления, показывают, что время протекания процесса фрагментации капли значительно больше значений, регистрируемых в эксперименте. Кроме того, эти гипотезы не позволяют описать цепной характер процесса дробления. Поэтому можно предположить, что подобный сценарий развития маловероятен для процесса тонкого диспергирования горячих капель.

4.3. Обсуждение. Большинство экспериментов по влиянию затвердевания на фрагментацию расплава проводилось с чистыми металлами, только в KTH (Швеция) рассматривался свинцово-висмутовый сплав. При этом было установлено сильное влияние состава сплава на затвердевание и тем самым на фрагментацию из-за возникновения в неэвтектических сплавах переходной зоны “ликвидус–солидус” (затвердевание протекает в некотором интервале температур), в которой резко возрастает вязкость. Этот важный факт требует продолжения дальнейших исследований в данном направлении, поскольку в реальных ситуациях расплав, скорее всего, будет представлять смесь различных компонент, например, при плавлении активной зоны реактора образуется расплав диоксидов урана и циркония с возможным присутствием чистого циркония и нержавеющей стали.

В теоретических работах затвердевшая поверхность рассматривается как упругая оболочка, препятствующая фрагментации расплава. На ос-

нове этого была обобщена теория Кельвина–Гельмгольца и полученные с помощью нее характерные значения диаметров фрагментов неплохо согласуются с экспериментальными данными.

Отметим плодотворность введения модифицированного числа Вебера, учитывающего упругость образовавшейся застывшей корки, что позволяет эффективно описывать ее влияние на фрагментацию расплава в рамках общей модели развития парового взрыва, реализованной в расчетных кодах.

Термомеханический механизм фрагментации капли расплава представляется маловероятным, поскольку не воспроизводит экспериментальные наблюдения. Модель дробления под действием проникновения в расплав водяных струй, дополненная кавитационно-акустическим механизмом, рассмотренная в разделе 3.1, выглядит намного убедительнее. Несмотря на это, качественные выводы, сделанные в [158–160], о причинах плохой взрываемости кориума из-за особенностей характеристик его теплофизических свойств и многокомпонентности состава безусловно имеют важное значение, но требуют, возможно, некоторого количественного уточнения.

5. РОЛЬ ОКИСЛЕНИЯ РАСПЛАВА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАСПЛАВА С ВОДОЙ

5.1. Влияние окисления расплава. В [168] отмечается, что проблема точного моделирования процесса окисления является на данный момент наиболее важной для реалистичной оценки последствий термического взаимодействия расплава с охладителем. Экспериментальные данные свидетельствуют о противоречивом влиянии выделяющегося водорода на энергетику парового взрыва – в экспериментах, описанных в разделе 2.2, наличие водорода снижало вероятность возникновения парового взрыва и его мощность, но в экспериментах SIGMA [169] по взаимодействию капель алюминия с водой в ударных волнах и экспериментах ZREX [170–172] по взаимодействию расплава, содержащего цирконий, с водой, напротив, процесс окисления значительно усиливал мощность взрыва.

Проблема описания окисления трудна по нескольким причинам. Во-первых, окисление происходит в весьма специфических условиях, когда расплав имеет очень высокую температуру и, как правило, находится в жидком состоянии. Во-вторых, процесс окисления вызывает разнонаправленное воздействие на протекание парового взрыва: 1) образование водорода (неконденсируемый газ) увеличивает объемное газосодержание смеси, что ослабляет взрывное взаимодействие, 2) выделение тепла в результате экзотермической реакции разогревает расплав и замедляет отвердевание поверхности, что способствует более интенсивной фрагментации расплава и усилению взрывной способности смеси, 3) в результате окисления меняются теплофизические свойства расплава, что также может привести либо к ослаблению, либо к усилению взрывной способности.

5.2. Существующие подходы. В настоящее время имеется несколько основных моделей, позволяющих описать процессы окисления высокотемпературного расплава.

В [173] предложена модель окисления низкотемпературных фрагментов (микросфер) расплавленного алюминия в воде в процессе парового взрыва. Эксперименты по взаимодействию расплавленного алюминия массой около 1 кг с водой показали, что окисление алюминия происходит при довольно низких температурах расплава ~1150 K (температура плавления алюминия – 933 K), однако для инициирования взрывного взаимодействия необходимо применять достаточно мощный триггер. Такая температура окисления значительно ниже диапазона температур 1700–2300 K, в котором наблюдалось окисление алюминиевых проволочек и частиц в неподвижной атмосфере окислителя. Эпштейн и Фауске на основе теории Оствальда предположили [173], что химическая трансформация жидкого расплавленного алюминия в твердый оксид алюминия проходит через три стадии: 1) химическая реакция между растворенным кислородом и расплавленным алюминием с образованием метастабильного расплавленного оксида алюминия (температура плавления оксида алюминия – 2320 K); 2) образование твердых кристаллов оксида алюминия в метастабильном расплаве; 3) рост кристаллов и образование отвердевшего оксида алюминия. Во время первых двух стадий полагается, что скорость, с которой кислород поглощается растущим жидким слоем оксида алюминия, достаточно высокая для быстрого окисления фрагментов расплава в зоне парового взрыва. Завершение третьей стадии сопровождается резким уменьшением скорости поглощения кислорода, т.е. окончанием химической реакции, после чего начинается охлаждение фрагмента. Таким образом, согласно данной теории окисление алюминия определяется соотношением скоростей химической реакции и кристаллизации оксида алюминия. Эта модель была подтверждена сопоставлением с экспериментальными данными, полученными на установке SIGMA [174].

В [175] излагается модель химического взаимодействия капель расплава с водой в основном применительно к алюминию, однако также обсуждается и цирконий. Рассматривается капля расплава, движущаяся в воде. Движение реагентов, кислорода и металлов к фронту химической реакции ограничивается диффузионным транспортом через слой оксида металла и через газовую смесь

пар–водород. Сначала рассматривается слой оксида металла на поверхности капли. Скорость диффузии химических компонент (металл и кислород) через конденсированную фазу оксида металла зависит от особенностей металла и его оксида. Для циркония реакция в основном протекает на границе раздела металл/оксид металла. Возможная причина этого состоит в том, что атомам кислорода легче диффундировать через оксид циркония. Для алюминия ситуация противоположная – гетерогенная реакция имеет место на границе оксид металла/газ. Модель определяет диффузию расплавленного металла через слой оксида металла и диффузию кислорода через газовую смесь пар–водород и слой оксида металла. Для того, чтобы определить количество перенесенного кислорода через газовую смесь пар–водород, нужно вычислить концентрацию пара на границе раздела вода/пар и поверхности слоя оксида. Величина вычисляется на основе значения давления пара на поверхности пар–жидкость (показывается, что концентрация водорода там пренебрежимо мала). Концентрация кислорода на поверхности оксидного слоя определяется из уравнения сохранения массы кислорода, диффундирующего через слой оксида металла и газовую смесь пара и водорода. Диффузия кислорода и металла через оксидный слой рассчитывается с использованием эмпирической зависимости Аррениуса. Уравнения переноса массы записываются, исходя из аналогии между массо- и теплопереносом. Модель не учитывает в явном виде влияние диффузии на профили температуры и концентрации пара в паровой пленке. Детальное сравнение данной модели с более полной моделью [173] показало, что указанный выше эффект не оказывает заметного влияния на результаты.

Было также установлено, что твердый оксид алюминия настолько стабилен, что диффузия реагентов через него практически отсутствует. Следовательно, химическая реакция ограничивается временем, в течение которого оксидный слой является жидким. Это время достаточно малое, поскольку оксид быстро охлаждается и замерзает. Масштаб времени определяется процессом кристаллизации, который превращает жидкий оксид в твердый. Этот масштаб времени может быть достаточен для нагрева металла до точки его воспламенения вследствие повышения температуры слоя оксида до его расплавления из-за энергии, выделяющейся в результате химической реакции. Для расчета этого масштаба времени использовалась модель [173]. Время, в течение которого объем кристаллических частиц растет до такой величины, что частицы начинают касаться друг друга, полагалось искомым временем, когда жидкий переохлажденный оксид металла превращается в твердую фазу.

В [176] предложена модель окисления капель расплавленного циркония и проведено сравнение с результатами экспериментов ZREX. Предполагается, что расплав состоит из двух компонентов: циркония Zr и диоксида циркония ZrO_2. Цирконий способен реагировать с водяным паром с образованием водорода и выделением тепла. Ход этой реакции определяется физико-химическими процессами как внутри самой капли кориума, так и снаружи вблизи ее поверхности. Кислород, необходимый для окисления циркония, поступает в каплю извне в составе молекул водяного пара, которые диффундируют к поверхности капли сквозь газообразный слой смеси пар–водород. От капли во внешнюю среду через этот же слой движется встречный диффузионный поток водорода. Таким образом, скорость подвода водяного пара к поверхности капли является одним из факторов, определяющих скорость пароциркониевой реакции. При приближении молекул водяного пара к поверхности капли происходит их абсорбция и диссоциация. Далее кислород диффундирует внутри капли к неокисленному цирконию через приповерхностный оксидный слой и вступает в реакцию с цирконием. Оксидный слой увеличивается со временем из-за окисления циркония, усиливая тем самым сопротивление поступлению кислорода в зону реакции. В экспериментальных работах по данной тематике определяется суммарное влияние всех этих процессов на ход протекания пароциркониевой реакции при обеспечении неограниченного подвода пара к поверхности капли. Полученные опытные данные достаточно хорошо описываются степенной зависимостью от времени и уравнением Аррениуса. Рассматривается окисление как капли чистого циркония, так и капли, исходно состоящей из циркония и диоксида циркония. При этом полагалось, что площадь поверхности, на которой происходит реакция окисления, пропорциональна объемной доле циркония.

Другой лимитирующий процесс – подвод молекул водяного пара к поверхности капли расплава, что делает необходимым анализ процесса диффузии водяного пара через газовый слой пар–водород к поверхности капли. Массовый поток кислорода через газовый слой пропорционален разности концентраций на внешней границе парогазовой пленки и на поверхности капли. Коэффициент массопередачи определяется при помощи аналогии между процессами массо- и теплопередачи, протекающими около капли. Возможны две типичные ситуации: 1) капля находится в воде в условиях пленочного кипения, 2) капля находится в парогазовой несущей среде. Коэффициенты теплоотдачи для этих случаев достаточно хорошо изучены. Зная коэффициенты теплоотдачи, можно определить соответствующие коэффициенты массопередачи.

Величины скоростей и температур капель расплава и воды, необходимые для замыкания модели, наряду с другими характеристиками движущейся многофазной среды, состоящей из расплава, водяного пара, воды и неконденсирующихся газов (водород, азот), определяются численным решением с помощью кода VAPEX уравнений сохранения массы, импульса и энергии для каждой фазы, сопряженных с моделью окисления капель циркония.

С помощью кода VAPEX, в который была внедрена эта модель, был выполнен анализ экспериментов ZREX по взаимодействию расплавленного циркония с водой. Показано, что код VAPEX удовлетворительно предсказывает количество водорода, образующегося в ходе этого взаимодействия, при значении критического числа Вебера, определяющем процесс дробления капель и равном 14.

В [177] разработана макроскопическая модель окисления для кода MC3D, основанная на предположении о том, что лимитирующим механизмом является диффузия водорода к поверхности капли расплава. Капля считается жидкой, при этом полагается, что диффузия в расплаве протекает очень быстро и не является лимитирующим процессом. Рассматривается два случая: 1) капля расплава в атмосфере газа, что характерно для процесса окисления на стадии предварительного перемешивания; 2) капля расплава в условиях пленочного кипения, что более вероятно для условий взрыва. Верификация разработанной модели осуществлялась путем сравнения с расчетами по более детальной модели, а также с доступными экспериментальными данными.

Следует отметить работы [178–181], в которых детально анализировались химические реакции, протекающие в расплаве, контактирующем с водяным паром. Использовался термодинамический подход, основанный на минимизации энергии Гиббса системы, в результате определялся химический состав расплава и газовой фазы при заданных температуре и давлении. В частности, было показано, что высокотемпературный оксид урана при взаимодействии с водяным паром выделяет водород, при этом состав расплава становится нестехиометрическим (переокисленным). Явление генерации водорода при взаимодействии натурного кориума (смесь оксидов урана и циркония) с водой наблюдалось в экспериментах FARO, KROTOS, TROI.

В [182, 183] расчетным путем изучалось влияние теплофизических свойств кориума на внекорпусной паровой взрыв. Для этого использовался один из самых продвинутых на сегодняшний день кодов – MC3D, разработанный для моделирования парового взрыва. Получено, что существенное значение на протекание парового взрыва имеет состав расплава: представляет ли он собой смесь оксидов или в нем есть металлические компоненты. Среди теплофизических параметров наибольшее влияние на закономерности протекающих процессов оказывает поверхностное натяжение расплава.

5.3. Обсуждение. Возможное наличие в расплаве неокисленных металлов и присутствие кислорода в воде и водяном паре, а также химически высокие температуры материалов, участвующих в рассматриваемых процессах, актуализируют вопрос о влиянии окисления расплава на его термическое взаимодействие с водой. Можно согласиться с мнением, высказанным в обзоре [168], что действительно проблема точного моделирования процесса окисления является на данный момент наиболее важной для реалистичной оценки последствий термического взаимодействия расплава с охладителем. Трудность решения этой проблемы заключается в многообразии форм реализации процесса окисления в условиях многофазного течения, когда компоненты смеси имеют разные фазовые состояния (газовое, жидкое, твердое), различные температуры и скорости. Успешные примеры учета процесса окисления в термическом взаимодействии расплава с охладителем остаются единичными. Общий подход к решению проблемы состоит в последовательном внедрении моделей физико-химических процессов в комплексные математические модели развития парового взрыва, что само по себе является очень непростой задачей, а кроме того, потребуются обширные экспериментально-расчетные работы по получению новых опытных данных, валидации и усовершенствованию созданных моделей.

Следует отметить работы [178–181], в которых наконец-то было получено ясное объяснение генерации водорода при взаимодействии натурного кориума (смесь оксидов урана и циркония) с водой, наблюдавшейся в экспериментах FARO, KROTOS, TROI.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Явление парового взрыва, интерес к которому возник в середине XX в., до сих пор привлекает внимание исследователей во всем мире. Во многих случаях паровой взрыв способен привести к возникновению значительных импульсных и ударных нагрузок с ростом давления до уровня, представляющего опасность целостности индустриальных объектов, в первую очередь – АЭС. Определение вероятности возникновения и возможных последствий паровых взрывов является неотъемлемой частью анализа безопасности существующих и проектируемых атомных электростанций.

Паровой взрыв как теплофизическое и гидродинамическое явление интересен тем, что в нем сочетается целый ряд взаимосвязанных нестационарных процессов, а взаимодействия в трехфаз-

ной системе “расплав–пар–жидкий охладитель” охватывают такие разделы классической гидродинамики, теплофизики и механики многофазных сред, как течения со свободной поверхностью, развитие неустойчивостей и распад струй и капель, волновые явления в многофазных средах, быстрые фазовые переходы, ударные воздействия и детонация. Эти явления описываются целым спектром пространственно-временных масштабов – от микромасштабов (микросекунды, микрометры), характеризующих гомогенную нуклеацию и вскипание перегретой жидкости, до глобальных масштабов (доли секунды, метры) на стадии предварительного перемешивания и при инерционном разлете продуктов термической детонации.

Неудивительно, что для исследования паровых взрывов и построения соответствующих теорий широко применяются математический аппарат и физические представления, наработанные в смежных, а зачастую – и далеких областях знания. Так, отдельные явления при паровом взрыве исследуются методами линейного анализа устойчивости (дробление струй и капель, в том числе при наличии двух жидких фаз с паровой прослойкой), анализ пленочного кипения на поверхности капли расплава выполняется для более простых, хотя и во многом аналогичных систем (кипение недогретой жидкости вблизи нагретых сфер и твердых поверхностей). Другим примером является применение метода адиабат Гюгонио для анализа волны термической детонации, которая, однако, существенно отличается от химической детонации.

Однако в целом анализ литературы по паровым взрывам приводит к выводу о том, что значительные успехи в понимании отдельных физических явлений, сопровождающих паровые взрывы, до сих пор не объединены общей теорией, обладающей возможностью предсказывать всю цепочку событий в едином ключе. Так, исследования взрыва отдельных капель расплава проливают свет на фундаментальные механизмы коллапса паровой пленки, прямого контакта расплава с охладителем и последующей фрагментации капли расплава. При этом существующие теории фрагментации капель и струй не в полной мере объясняют такие экспериментальные факты, как зависимость длины распада струи от ее скорости (числа Фруда), сильная зависимость характеристик взрыва от материала расплава и т.д. И достаточно далеки от своего решения на удовлетворительном уровне многие практически важные вопросы, например, в какой степени интегральные характеристики паровых взрывов при взаимодействии с охладителем десятков и сотен килограмм расплава зависят от процессов микровзрывов отдельных капель, в том числе какую роль играют коллективные эффекты, приводящие к распространению самоподдерживающейся волны термической детонации.

В настоящей работе выполнен обзор экспериментальных и теоретических исследований термического взаимодействия высокотемпературных расплавов с жидкими охладителями, температура кипения которых существенно ниже температуры расплавов. Рассмотрен основной сценарий взаимодействия расплава с охладителем, реализующийся при вливании струи расплава в охладитель с ее последующей фрагментацией, вторичным дроблением капель расплава, перемешиванием, распространением волны термической детонации и расширением продуктов парового взрыва. Рассмотрены как крупномасштабные интегральные эксперименты, так и исследования отдельных процессов, протекающих при паровом взрыве (фрагментация, одиночные капли, отвердевание и окисление расплава). При этом за рамками рассмотрения остался целый ряд принципиальных вопросов, касающихся термического взаимодействия расплавов с охладителями (стратифицированный паровой взрыв, струйное проникновение охладителя в расплав, влияние свойств материала расплава). Намеренно не затрагивались вопросы численного моделирования паровых взрывов и создания расчетных кодов для моделирования термического взаимодействия расплава с охладителем в ходе тяжелой аварии на АЭС. Эта тема является обширной, динамично развивающейся, несомненно заслуживающей отдельного обзора, поскольку именно вычислительные модели являются центром имплементации как экспериментальных данных и эмпирической информации, так и теоретических моделей и подходов.

В заключение сформулируем наиболее актуальные задачи для будущих исследований.

1) Все крупномасштабные интегральные эксперименты на сегодняшний день выполнены со свободным проливом струи расплава в центр сосуда с охладителем. Такой сценарий маловероятен при тяжелой аварии на АЭС, скорее всего, реализуется боковой несимметричный пролив струи. Как повлияет подобная конфигурация на силу воздействия парового взрыва на окружающие конструкции, не очень ясно, для этого нужны соответствующие расчеты с помощью трехмерных кодов. Поскольку эти расчетные коды должны быть валидированы на экспериментальных данных, то возникает потребность в проведении экспериментов по изучению влияния места подачи струи расплава в сосуд с охладителем.

2) Большинство экспериментов по влиянию затвердевания на фрагментацию расплава проводилось с чистыми металлами. Однако в реальных ситуациях расплав, скорее всего, будет представлять смесь различных компонент. Например, при плавлении активной зоны реактора образуется расплав диоксидов урана и циркония с возможным присутствием чистого циркония и нержаве-

ющей стали. При этом отклонение от эвтектического состава ведет к возникновению температурного интервала (ликвидус–солидус), в котором происходит затвердевание. Очевидно, что для оценки этого эффекта необходимо провести эксперименты по систематическому изучению влияния состава многокомпонентного расплава на процесс затвердевания.

3) Процесс окисления жидких металлов наименее изучен экспериментально, что затрудняет валидацию имеющихся математических моделей. Необходимы как маломасштабные эксперименты с высокотемпературными каплями, контактирующими с паром, для исследования кинетики окисления, так и интегральные эксперименты с жидкими металлами, которые позволят установить общее воздействие окисления на мощность парового взрыва (ослабление/усиление).

4) С точки зрения фундаментального описания инициирования взрывного взаимодействия необходимо обобщение имеющихся моделей возникновения неустойчивого пленочного кипения на твердых нагретых сферах для учета дополнительных факторов (вынужденное движение охладителя, свободная поверхность жидкой капли расплава).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-18-50098.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Witte L.C., Cox J.E.* Thermal Explosion Hazard // Advances in Nuclear Science and Technology. 1973. V. 7. P. 329.
2. *Zyszkowsky W.* Thermal Explosion Hazard in (Fast) Nuclear Reactors // Atomic Energy Review. 1978. V. 16 (1). P. 3.
3. *Corradini M.L., Kim B.J., Oh M.D.* Vapor Explosions in Light Water Reactors: A Review of Theory and Modeling // Prog. Nucl. Energy. 1988. V. 22. № 1. P. 1.
4. *Berthoud G.* Vapor Explosions // Ann. Review Fluid Mech. 2000. V. 32. P. 573.
5. *Meignen R., Picchi S., Lamome J., Raverdy B., Escobar S.C., Nicaise G.* The Challenge of Modeling Fuel-Coolant Interaction: Part I – Premixing // Nucl. Eng. Design. 2014. V. 280. P. 511.
6. *Meignen R., Raverdy B., Picchi S., Lamome J.* The Challenge of Modeling Fuel-Coolant Interaction: Part II – Steam Explosion // Nucl. Eng. Design. 2014. V. 280. P. 528.
7. *Meignen R., Raverdy B., Buck M. et al.* Status of Steam Explosion Understanding and Modelling // Ann. Nucl. Energy. 2014. V. 74. P. 125.
8. *Shen P., Zhou W., Cassiaut-Lois N., Journeau C., Piluso P., Liao Y.* Corium Behavior and Steam Explosion Risks: A Review of Experiments // Ann. Nucl. Energy. 2018. V. 121. P. 162.
9. *Степанов Е.В.* Физические аспекты явления парового взрыва. Препринт № 5450/3. М.: ИАЭ, 1991. 97 с.
10. *Ефанов А.Д., Загорулько Ю.Н., Ремизов О.В., Козлов Ф.А., Сорокин А.П., Богатырев И.Л.* Паровые взрывы: анализ экспериментальных исследований // Теплоэнергетика. 1997. № 8. С. 17.
11. *Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е.* Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов. М.: Изд-во ИПМех РАН, 2020. 276 с.
12. *Kudinov P., Grishchenko D., Konovalenko A., Karbojian A.* Premixing and Steam Explosion Phenomena in the Tests with Stratified Melt-Coolant Configuration and Binary Oxidic Melt Simulant Materials // Nucl. Eng. Design. 2017. V. 314. P. 182.
13. *Безносов А.В., Бокова Т.А.* Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике. Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2012. 536 с.
14. *Kolev N.I.* The Code IVA3 for Modelling of Transient Three-Phase Flows in Complicated 3D Geometry // Kerntechnik. 1993. V. 58 (3). P. 147.
15. *Morita K., Kondo Sa., Tobita Y., Brear D.J.* SIMMER III Applications to Fuel-Coolant Interactions // Nucl. Eng. Design. 1999. V. 189. P. 337.
16. *Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е.* Анализ крупномасштабных экспериментов по взаимодействию кориума с водой с помощью кода VAPEX // ТВТ. 2007. Т. 45. С. 565.
17. *Corradini M.L.* Analysis and Modeling of Large-scale Steam Explosions Experiments // Nucl. Sci. Eng. 1982. V. 82. P. 429.
18. *Corradini M.L.* Molten Fuel/Coolant Interactions: Recent Analysis of Experiments // Nucl. Sci. Eng. 1984. V. 86. P. 372.
19. *Yamano N., Maruyama Y., Kudo T., Hidaka A., Sugimoto J.* Phenomenological Studies on Melt-Coolant Interactions in the ALPHA Program // Nucl. Eng. Design. 1995. V. 155. P. 369.
20. *Moriyama K., Yamano N., Maruyama Y., Kudo T., Sugimoto J.* ALPHA Visual Data Collection STX005-025: Melt Drop Steam Explosion Experiments. JAERI – Data/Code, 99-017, 1999.
21. *Magallon D., Huhtiniemi I., Hohmann H.* Lessons Learnt from FARO/TERMOS Corium Melt Quenching Experiments // Nucl. Eng. Design. 1999. V. 189. P. 223.
22. *Magallon D., Huhtiniemi I.* Corium Melt Quenching Tests at Low Pressure and Subcooled Water in FARO // Nucl. Eng. Design. 2001. V. 204. P. 369.
23. *Huhtiniemi I., Magallon D., Hohmann H.* Results of Recent KROTOS FCI Tests: Alumina vs. Corium Melts // Nucl. Eng. Design. 1999. V. 189. P. 379.
24. *Huhtiniemi I., Magallon D.* Insight into Steam Explosions with Corium Melts in KROTOS // Nucl. Eng. Design. 2001. V. 204. P. 391.
25. OECD/SERENA Project Report. Summary and Conclusions. NEA/CSNI/R(2014) 15, February 2015. https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2020-01/csni-r2014-15.pdf
26. *Song J.H., Park I.K., Chang Y.J., Shin Y.S., Kim J.H., Min B.T., Hong S.W., Kim H.D.* Experiments on the Interactions of Molten ZrO_2 with Water Using TROI Facility // Nucl. Eng. Design. 2002. V. 213. Iss. 2–3 (April 2002). P. 97.
27. *Song J.H., Park I.K., Shin Y.S., Kim J.H., Hong S.W., Min B.T., Kim H.D.* Fuel Coolant Interaction Experi-

ments in TROI Using a UO_2/ZrO_2 Mixture // Nucl. Eng. Design. V. 222. Iss. 1 (May 2003). P. 1.
28. *Song J.H., Hong S.W., Kim J.S. et al.* Insights from the Recent Steam Explosion Experiments in TROI // Nucl. Sci. Technol. 2003. V. 40. № 10. P.783.
29. *Kim J.H., Park I.K., Hong S.W. et al.* Steam Explosion Experiments with Iron-Added Corium in the TROI Facility // Trans. Korean Nuclear Society Spring Meeting. Chuncheon, Korea, May 25–26, 2006.
30. *Загорулько Ю.И., Жмурин В.Г., Волов А.Н., Ковалев Ю.П.* Экспериментальные исследования термического взаимодействия кориума с теплоносителями // Теплоэнергетика. 2008. № 3. С. 48.
31. *Загорулько Ю.* Фрагментация кориума в теплоносителях // Росэнергоатом. 2008. № 8. С. 38.
32. *Kim J.H., Min B.T., Park I.K. et al.* Steam Explosion Experiments Using Partially Oxidized Corium // Mech. Sci. Technol. 2008. V. 22. P. 2245.
33. *Kim J.H., Min B.T., Park I.K. et al.* Triggered Steam Explosions with Corium Melts of Various Compositions in a Narrow Interaction Vessel in the TROI Facility // Nucl. Technol. 2010. V. 169:3. P. 239. https://doi.org/10.13182/NT169-239
34. *Kim J.H., Min B.T., Park I.K. et al.* Triggered Steam Explosions with the Corium Melts of Various Compositions in a Two-Dimensional Interaction Vessel in the TROI Facility // Nucl. Technol. 2011. V. 176:3. P. 372. https://doi.org/10.13182/NT11-A13314
35. *Saito M., Sato K., Imahori S.* Experimental Study on Penetration Behaviors of Water Jet into Freon-11 and Liquid Nitrogen // ANL Proc.: National Heat Transfer Conference. 1988. P. 173.
36. *Epstein M., Fauske H.K.* Applications of the Turbulent Entrainment Assumption to Immiscible Gas-Liquid and Liquid-Liquid Systems // Chem. Eng. Res. Des. 2001. V. 79(4). P. 453.
37. *Ricou F.B., Spalding D.B.* Measurements of Entrainment of Axisymmetrical Turbulent Jets // J. Fluid Mech. 1961. V. 11. P. 21.
38. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959. 699 с.
39. *Taylor G.I.* The Dispersion of Jets of Metals at Low Melting Point in Water. In: The Scientific Papers of Sir Geoffrey Ingram Taylor / Ed. G.K. Batchelor. Cambridge University Press. 1963. V. 3. P. 304.
40. *Мелихов О.И.* Определение устойчивости и длины распада струи расплава в воде // ПМТФ. 1995. Т. 36. № 1. С. 99.
41. *Iwasawa Y., Abe Y.* Melt Jet-Break-up and Fragmentation Phenomena in Nuclear Reactors: A Review of Experimental Works and Solidification Effects // Prog. Nucl. Energy. 2018. V. 108. P. 188.
42. *Kudinov P., Karbojian A., Weimin M., Dinh T.N.* The DEFOR-S Experimental Study of Debris Formation with Corium Simulant Materials // Nucl. Technol. 2010. V. 170. P. 219.
43. *Manickam L., Thakre S., Ma W., Bechta S.* Simultaneous Visual Acquisition of Melt Jet Breakup in Water by High Speed Videography and Radiography // Proc. 10th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-10). December 14–18, 2014. Okinawa, Japan. P. 1.
44. *Manickam L., Kudinov P., Ma W., Bechta S., Grishchenko D.* On the Influence of Water Subcooling and Melt Jet Parameters on Debris Formation // Nucl. Eng. Design. 2016. V. 309. P. 265.
45. *Manickam L., Bechta S., Ma W.* On the Fragmentation Characteristics of Melt Jets Quenched in Water // Int. J. Multiphase Flow. 2017. V. 91. P. 262.
46. *Manickam L.* An Experimental Study on Melt Fragmentation, Oxidation and Steam Explosion during Fuel Coolant Interactions. Doctoral thesis. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2018. 99 p.
47. *Kim H.T., Bang K.H.* Composition of Jet Breakup in Fully- Flooded and Partially Flooded Reactor Cavity // Proc. 11th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics, Operation and Safety (NUTHOS-11). October 9–13, 2016. Gyeongju, Korea. P. 1.
48. *Bang K.H., Kim H.T.* Experiment and Modeling of Jet Breakup in Fuel-Coolant Interactions // Proc. 8th European Review Meeting on Severe Accident Research (ERMSAR-2017). May 16–18, 2017. Warsaw, Poland. P. 1.
49. *Bang K.H., Kim H.T., Tan V.D.* Jet Breakup of a Simulant Melt in Water with and without Free Fall in Air // Trans. Korean Nuclear Society Spring Meeting. May 17–18, 2018. Jeju, Korea.
50. *Bang K.H., Kim H.T., Tan V.D.* Experiment and Modeling of Jet Breakup in Fuel-Coolant Interactions // Ann. Nucl. Energy. 2018. V. 118. P. 336.
51. *Li Y., Wang W., Lin M., Zhong M., Zhou Y., Yang Y.* Experimental Studies on Breakup and Fragmentation Behavior of Molten Tin and Coolant Interaction // Sci. Technol. Nucl. Install. 2017. V. 2017. 4576328.
52. *Ye Y., Chen X., Cheng S.* Experimental Study on Melt-Jet Behavior during SFR Core Disruptive Accidents Using Simulant Materials // Ann. Nucl. Energy. 2020. V. 148. 107705.
53. *Huang W.L., Sa R.Y., Zhou D.N. et al.* Experimental Study on Fragmentation Behaviors of Molten LBE and Water Contact Interface // Nucl. Sci. Technol. 2015. V. 26. 060601.
54. *Huang W., Zhou D.N., Sa R., Jiang H.* Experimental Study on Thermal-Hydraulic Behaviour of LBE and Water Interface // Prog. Nucl. Energy. 2017. V. 99. P. 1.
55. *Iwasawa Y., Abe Y.* Scaling Analysis of Melt Jets and Solidification Modes // Ann. Nucl. Energy. 2019. V. 125. P. 231.
56. *Chen J., Zhou Y., Zhao J., Cai J., Gong H.* Experimental and Theoretical Study of Jet Hydrodynamic Breakup Behavior with Air Entrainment // Ann. Nucl. Energy. 2021. V. 151. 107900.
57. *He L., Liu P., Zhang X., Kuang B., Hu W., Wei L.* Experimental Study on the Effects of Boiling During Molten Jet and Coolant Interactions // Ann. Nucl. Energy. 2020. V. 143. 107392.
58. *Matsuba K., Kamiyama K., Toyooka J., Tobita Y., Zuev V.A., Kolodeshnikov A.A., Vasilyev Y.S.* Experimental Discussion on Fragmentation Mechanism of Molten Oxide Discharged into a Sodium Pool // Bulletin of the JSME. Mech. Eng. Journal. 2016. V. 3. № 3. P. 1.
59. *Matsuba K., Isozaki M., Kamiyama K., Tobita Y.* Distance for Fragmentation of a Simulated Molten-Core Material Discharged into a Sodium Pool // J. Nucl. Sci. Technol. 2016. V. 53. № 5. P. 707.
60. *Johnson M., Journeau C., Matsuba K., Emura Y., Kamiyama K.* Characterization of High-temperature Nuclear Fuel–Coolant Interactions Through X-ray Visu-

alization and Image Processing // Ann. Nucl. Energy. 2021. V. 151. 107881.

61. *Jung W.H., Park H.S., Moriyama K., Kim M.H.* Analysis of Experimental Uncertainties in Jet Breakup Length and Jet Diameter During Molten Fuel-Coolant Interaction // Nucl. Eng. Design. 2019. V. 344. P. 183.
62. *Saito R., Abe Y., Yoshida H.* Experimental Study on Breakup and Fragmentation Behavior of Molten Material Jet in Complicated Structure of BWR Lower Plenum // J. Nucl. Sci. Technol. 2014. V. 51. № 1. P. 64.
63. *Narushima Y., Saito S., Yoshida H., Abe Y.* Experimental Investigation of Jet Fragment Diameter in BWR Complicated Structures Using Image Processing Techniques // J. Nucl. Sci. Technol. 2019. V. 56. № 12. P. 1157.
64. *Saito S., Abe Y., Kaneko A., Kanagawa T., Iwasawa Y., Koyama K., Nariai H.* Jet Breakup and Droplet Formation in Immiscible Liquid-Liquid System // Proc. 24th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE24). June 26–30, 2016, Charlotte, North Carolina, USA.
65. *Saito S., Abe Y., Koyama K.* Flow Transition Criteria of a Liquid Jet into a Liquid Pool // Nucl. Eng. Design. 2017. V. 315. P. 128.
66. *Dullforce T.E., Buchanan D.J., Perckover R.S.* Self-triggering of Small-scale Fuel–Coolant Interactions: I. Experiments // J. Phys. D: Appl. Phys. 1976. V. 9. № 9. P. 1295.
67. *Nelson L.S., Duda P.M.* Steam Explosions of Molten Iron Oxide Drops: Easier Initiation at Small Pressurizations // Nature. 1982. V. 296. P. 844.
68. *Nelson L.S.* Steam Explosions of Single Drops of Pure and Alloyed Molten Aluminum // Nucl. Eng. Design. 1995. V. 155. P. 413.
69. *Nelson L.S., Brooks P.W., Bonazza R., Corradini M.L., Hildal K., Bergstrom T.H.* Steam Explosions of Single Drops of Molten Steam Explosions of Single Drops of Molten Silicon-rich Alloy // Ninth Int. Ferroalloys Congr. 2005. P. 338.
70. *Ciccarelli G., Frost D.L.* Fragmentation Mechanisms Based on Dingle Frop Steam Explosion Experiments Using Flash X-ray Radiography // Nucl. Eng. Design. 1994. V. 146. P. 109.
71. *Chen X., Luo R., Yuen W.W., Theofanous T.G.* Experimental Simulation of Microinteractions in Large Scale Explosions // Nucl. Eng. Design. 1999. V. 189. P. 163.
72. *Abe Y., Nariai H., Hamada Y.* The Trigger Mechanism of Vapor Explosion // J. Nucl. Sci. Technol. 2002. V. 39. P. 845.
73. *Takashima T.* Observations of Initiation Stage of Spontaneous Vapor Explosions for Droplet Scale // Heat Transf. Res. 2008. V. 37. P. 41.
74. *Kouraytem N., Li E.Q., Thoroddsen S.T.* Formation of Microbeads During Vapor Explosions of Field's Metal in Water // Phys. Rev. E. 2016. V. 93. P. 063108.
75. *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. P. 351.
76. *Hansson R.C., Park H.S., Dinh T.-N.* Dynamics and Preconditioning in a Single-Droplet Vapor Explosion // Nucl. Technol. 2009. V. 167. P. 223.
77. *Hansson R.C., Park H.S., Dinh T.-N.* Simultaneous High Speed Digital Cinematographic and X-ray Radiographic Imaging of a Intense Multi-fluid Interaction with Rapid Phase Changes // Exp. Therm. Fluid Sci. 2009. V. 33. P. 754.
78. *Zambaux J.A., Manickam L., Meignen R., Ma W.M., Bechta S., Picchi S.* Study on Thermal Fragmentation Characteristics of a Superheated Alumina Droplet // Ann. Nucl. Energy. 2018. V. 119. P. 352.
79. *Manickam L., Qiang G., Ma W., Bechta S.* An Experimental Study on the Intense Heat Transfer and Phase Change During Melt and Water Interactions // Exp. Heat Transf. 2019. V. 32. P. 251.
80. *Manickam L., Guo Q., Komlev A., Ma W., Bechta S.* Oxidation of Molten Zirconium Droplets in Water // Nucl. Eng. Design. 2019. V. 354. P. 110225.
81. *Manickam L.* An Experimental Study on Melt Fragmentation, Oxidation and Steam Explosion During Fuel Coolant Interaction. Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2018.
82. *Buchanan D.J.* A Model for Fuel–Coolant Interactions // J. Phys. D: Appl. Phys. 1974. V. 7. № 10. P. 1441.
83. *Buchanan D.J.* Penetration of a Solid Layer by a Liquid Jet // J. Phys. D: Appl. Phys. 1973. V. 6. № 15. P. 1762.
84. *Kim B., Corradini M.L.* Modeling of Small-scale Single Droplet Fuel Coolant Interactions // Nucl. Sci. Eng. 1988. V. 98. № 2. P. 16.
85. *Bang K.H., Corradini M.L.* Vapor Explosions in a Stratified Geometry // Nucl. Sci. Eng. 1991. V. 108. № 1. P. 88.
86. *Ciccarelli G., Frost D.* Fragmentation Mechanisms Based on Single Drop Steam Explosion // Nucl. Eng. Design. 1994. V. 146. P. 109.
87. *Hansson R.* An Experimental Study on the Dynamics of a Single Droplet Vapor Explosion. Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2018.
88. *Ивочкин Ю.П., Зейгарник Ю.А., Кубриков К.Г.* Механизмы тонкой фрагментации горячего расплава, погруженного в холодную воду // Теплоэнергетика. 2018. № 7. С. 64.
89. *Kazimi M.S.* Theoretical Studies of Some Aspects of Molten Fuel-Coolant Thermal Interactions. Science Doctorate Thesis. Cambridge, Massachusetts: MIT, 1973.
90. *Motte E.I.* Film Boiling of Flowing Subcooled Liquids. M.S. Thesis. University of California, Berkley, 1954.
91. *Motte E.I., Bromley L.A.* Film Boiling of Flowing Subcooled Liquids // Industrial and Engineering Chemistry. 1957. V. 49. № 11. P.1921.
92. *Farahat M.M.K.* Transient-boiling Heat Transfer from Spheres to Sodium. Report ANL-7909, 1972.
93. *Farahat M.M.K., Eggen D.T., Armstrong D.R.* Pool Boiling in Subcooled Sodium at Atmospheric Pressure // Nuclear Science and Engineering. 1974. V. 53 : 2. P. 240.
94. *Zvirin Y., Hewitt G.R., Kenning D.B.R.* Boiling on Free-falling Spheres: Drag and Heat Transfer Coefficients // Experimental Heat Transfer. 1990. V. 3 : 3. P. 185.
95. *Honda H., Takamatsu H., Yamashiro H.* Heat Transfer Characteristics During Rapid Quenching of a Thin Wire in Water // Heat Transfer Japanese Research. 1992. V. 21. № 8. P. 773.
96. *Honda H., Takamatsu H., Yamashiro H.* Minimum Heat Flux Point and Liquid-solid Contacts During

Rapid Quenching of a Thin Wire // Heat Transfer Japanese Research. 1995. V. 24. № 6. P. 517.

97. *Liu C., Theofanous T.G.* Film Boiling on Spheres in Single- and Two-Phase Flows. Report DOE/ER/12933-3, DOE/ID-10499. 1996.

98. *Berthoud G., Gros D'Aillon L.* Film Boiling Heat Transfer Around a very High Temperature Thin Wire Immersed into Water at Pressure from 1 to 210 bar: Experimental Results and Analysis // Int. J. Thermal Sciences. 2009. V. 48. P. 1728.

99. *Sher I., Harari R., Reshef R., Sher E.* Film Boiling Collapse in Solid Spheres Immersed in a Sub-cooled Liquid // Applied Thermal Engineering. 2012. V. 36. P. 219.

100. *Ni P., Wen Z., Su F., Huang J., Liu X., Lou G., Dou R.* Film Boiling Collapse in a Solid Hot Sphere Immersed in Subcooled Forced Convection // Applied Thermal Engineering. 2020. V. 166. 114630.

101. *Ивочкин Ю.П.* Исследование механизмов термогидродинамических и МГД-процессов с жидкометаллическими рабочими телами. Дис. ... докт. техн. наук. М.: НИУ "МЭИ", 2015. 407 с.

102. *Глазков В.В., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Синкевич О.А., Цой В.Р.* Взрывной режим развития неустойчивости, приводящий к разрушению паровой пленки на твердой полусферической поверхности // Доклады РАН. 2001. Т. 376. № 3. С. 328.

103. *Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Глазков В.В., Синкевич О.А.* Поведение паровой пленки на сильно перегретой поверхности, погруженной в недогретую воду // ТВТ. 2005. Т. 43. № 1. С. 100.

104. *Глазков В.В., Григорьев В.С., Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Медвецкая Н.В., Оксман А.А., Синкевич О.А.* Об одном возможном механизме инициирования (триггеринга) парового взрыва // ТВТ. 2006. Т. 44. № 6. С. 913.

105. *Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Григорьев В.С., Оксман А.А.* Заметки о некоторых аспектах парового взрыва // ТВТ. 2008. Т. 46. № 5. С. 797.

106. *Жилин В.Г., Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Оксман А.А., Белов К.И.* Экспериментальное исследование характеристик взрывного вскипания недогретой воды на горячей поверхности при смене режимов кипения // ТВТ. 2009. Т. 47. № 6. С. 891.

107. *Белов К.И., Ивочкин Ю.П., Пузина Ю.Ю.* Исследование процесса соприкосновения охладителя с горячей поверхностью при вскипании недогретой жидкости // Вестник МЭИ. 2010. № 3. С. 44.

108. *Ивочкин Ю.П., Вавилов С.Н., Зейгарник Ю.А., Кубриков К.Г.* К вопросу об отсутствии фрагментации горячих капель при малых недогревах охладителя // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. № 4. С. 475.

109. *Ивочкин Ю.П., Зейгарник Ю.А., Вавилов С.Н., Ковалев С.А.* Оценка влияния температурных импульсов на показания пьезоэлектрических датчиков давления // ТВТ. 2013. Т. 51. № 5. С. 764.

110. *Лексин М.А., Ягов В.В., Варава А.Н.* Экспериментальное исследование теплоотдачи в условиях интенсивного охлаждения металлического шара // Вестник МЭИ. 2009. № 2. С. 28.

111. *Забиров А.Р., Лексин М.А., Ягов В.В.* Закономерности теплообмена в процессах закалки // Вестник МЭИ. 2015. № 1. С. 51.

112. *Ягов В.В., Забиров А.Р., Лексин М.А.* Нестационарный теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости // Теплоэнергетика. 2015. № 11. С. 70.

113. *Забиров А.Р., Ягов В.В., Кабаньков О.Н., Лексин М.А., Канин П.К.* Влияние давления на устойчивое пленочное кипение недогретой жидкости // ИФЖ. 2016. Т. 89. № 6. С. 1487.

114. *Yagov V.V., Leksin M.A., Zabirov A.R., Denisov M.A.* Film Boiling of Subcooled Liquids. Part I: Leidenfrost Phenomenon and Experimental Results for Subcooled Water // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 100. P. 908.

115. *Yagov V.V., Leksin M.A., Zabirov A.R., Denisov M.A.* Film Boiling of Subcooled Liquids. Part II: Steady Regimes of Subcooled Liquids Film Boiling // Int. J. Heat Mass Transfer. 2016. V. 100. P. 918.

116. *Забиров А.Р., Ягов В.В., Канин П.К.* Влияние недогрева до насыщения и давления на пленочное кипение воды // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 2. С. 50.

117. *Ягов В.В., Забиров А.Р., Канин П.К., Денисов М.А.* Теплообмен при пленочном кипении недогретой жидкости: новые опытные результаты и расчетные уравнения // ИФЖ. 2017. Т. 90. № 2. С. 287.

118. *Yagov V.V., Zabirov A.R., Kabankov O.N., Minko M.V.* Heat Transfer During Cooling of High Temperature Spheres in Subcooled Water at Different Pressures // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 110. P. 219.

119. *Ягов В.В., Забиров А.Р., Канин П.К., Лексин М.А.* Приближенная модель возникновения режима интенсивного теплообмена при пленочном кипении недогретой жидкости // Труды седьмой Российской национальной конференции по теплообмену, 2018. С. 561.

120. *Yagov V.V., Zabirov A.R., Kanin P.K.* Heat Transfer at Cooling High-temperature Bodies in Subcooled Liquids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2018. V. 126. P. 823.

121. *Ягов В.В.* Кипение жидкостей: основные направления научных исследований (по материалам IHTC-16 и PHKT-7) // Теплоэнергетика. 2019. № 11. С. 16.

122. *Дедов А.В., Забиров А.Р., Слива А.П., Федорович С.Д., Ягов В.В.* Влияние углеродистого покрытия поверхности на теплообмен при нестационарном пленочном кипении // ТВТ. 2019. Т. 57. № 1. С. 72.

123. *Zabirov A., Yagov V., Kanin P., Ryzantcev V., Vinogradov M., Molotova I.* Pressure Influence on Unsteady Film Boiling of Water-ethanol Mixtures // Experimental Thermal and Fluid Science. 2020. V. 118. 110130.

124. *Лексин М.А., Ягов В.В., Забиров А.Р., Канин П.К., Виноградов М.М., Молотова И.А.* Исследование интенсивного охлаждения высокотемпературных тел в бинарной смеси вода–изопропанол // ТВТ. 2020. Т. 58. № 3. С. 393.

125. *Yagov V.V., Minko K.B., Zabirov A.R.* Two Distinctly Different Modes of Cooling High-temperature Bodies in Subcooled Liquids // Int. J. Heat Mass Transfer. 2021. V. 167. 120838.

126. *Honda H., Makishi O., Yamashiro H.* Generalized Stability Theory of Vapor Film in Subcooled Film Boiling on a Sphere // Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. V. 50. P. 3390.
127. *De Malmazet E., Berthoud G.* Convection Film Boiling on Horizontal Cylinders // Int. J. Heat Mass Transfer. 2009. V. 52. P. 4731.
128. *Berthoud G., Le Belguet A., Zabiego M.* The Farahat Sodium Natural Convection Film Boiling Experiment Revisited // Experimental Thermal and Fluid Science. 2017. V. 91. P. 117.
129. *De Malmazet E.* New Film Boiling Correlations for Drops and Fragments in Fuel-coolant Interaction Codes // NURETH-18. Portland, Oregon, US. August 18–22, 2019.
130. *Синкевич О.А.* Взрывное разрушение паровой пленки при интенсивных тепловых потоках // ТВТ. 2007. Т. 45. № 2. С. 243.
131. *Синкевич О.А.* Нелинейные колебания паровой пленки при интенсивных тепловых потоках // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 5. С. 66.
132. *Синкевич О.А., Глазков В.В., Киреева А.Н.* Обобщенное уравнение Рэлея–Ламба // ТВТ. 2012. Т. 50. № 4. С. 565.
133. *Sinkevich O.A., Glazkov V.V., Ivochkin Yu.P. et al.* Films under Influence of High Heat Fluxes: Nongravity Surface Waves and Film Explosive Disintegration // Int. J. Nonlinear Sciences and Numerical Simulation. 2013. V. 14. № 1. P. 1.
134. *Синкевич О.А.* Волны на поверхности кипящей жидкости при различных стратификациях сред // ЖЭТФ. 2015. Т. 148. Вып. 2(8). С. 169.
135. *Синкевич О.А.* Паровая пленка на плоской горячей вертикальной поверхности // ТВТ. 2021. Т. 59. № 1. С. 86.
136. *Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Кубриков К.Г., Синкевич О.А., Тепляков И.О.* Экспериментальные исследования соприкосновения воды с горячей металлической поверхностью // Труды Седьмой Российской национальной конференции по теплообмену. Москва, 22–26 октября 2018. С. 510.
137. *Bürger M., Cho S.H., Kim D.S., Carachalios C., Müller K., Fröhlich G.* Effect of Solid Crust on the Hydrodynamic Fragmentation of Melt Droplets. Institut für Kernenergetik und Energiesysteme der Universitat Stuttgart. Report No. IKE 2 TF-74, 1985.
138. *Bürger M., Cho S.H., Carachalios C., Müller K., Unger H., Jacobs H.* Effect of Solid Crusts on the Hydrodynamic Fragmentation of Melt Drops. In: Science and Technology of Fast Reactor Safety. London, Great Britain, 1986. P. 503.
139. *Yang J.W., Bankoff S.G.* Solidification Effects of the Fragmentation of Molten Metal Drops Behind a Pressure Shock Wave // J. Heat Transfer. 1987. V. 109. P. 226.
140. *Sugiyama K., Sotome F., Ishikawa M.* Thermal Interaction in Crusted Melts Jets with Large-Scale Structures // Nucl. Eng. Design. 1999. V. 189. P. 329.
141. *Li H.X., Haraldsson H.Ó., Dinh T.N., Green J.A., Sehgal B.R.* Fragmentation Behaviour of Melt Drop in Coolant: Effect of Melt Solidification // Proc. 3rd Int. Conf. on Multiphase Flows (ICMF3). June 8–12 1998. Lyon, France.
142. *Haraldsson H.Ó., Li H.X., Yang Z.L., Dinh T.N., Sehgal B.R.* Effect of Solidification on Drop Fragmentation in Liquid-Liquid Media // Heat Mass Transfer. 2001. V. 37. P. 417.
143. *Nishimura S., Kinoshita I., Sugiyama K., Ueda N.* Thermal Fragmentation of a Molten Metal Jet Dropped into a Sodium Pool at Interface Temperatures Below its Freezing Point // J. Nucl. Sci. Technol. 2002. V. 39. P. 752.
144. *Nishimura S., Kinoshita I., Sugiyama K., Ueda N.* Thermal Interaction Between Molten Metal Jet and Sodium Pool: Effect of Principal Factors Governing Fragmentation of the Jet // Nucl. Technol. 2005. V. 149. P. 189.
145. *Nishimura S., Sugiyama K., Kinoshita I., Itagaki W., Ueda N.* Fragmentation Mechanism of a Single Molten Copper Jet Penetrating a Sodium Pool – Transition from Thermal to Hydrodynamic Fragmentation in Instantaneous Contact Interface Temperatures Below Its Freezing Point // J. Nucl. Sci. Technol. 2010. V. 47. P. 219.
146. *Zhang Z.G., Sugiyama K., Itagaki W., Nishimura S., Kinoshita I., Narabayashi T.* Fragmentation of a Single Molten Metal Droplet Penetrating Sodium Pool. I. Copper Droplet and the Relationship with Copper Jet // J. Nucl. Sci. Technol. 2009. V. 46. P. 453.
147. *Zhang Z.G., Sugiyama K.* Fragmentation of a Single Molten Metal Droplet Penetrating Sodium Pool. II. Stainless Steel and the Relationship with Copper Droplet // J. Nucl. Sci. Technol. 2010. V. 47. P. 169.
148. *Zhang Z.G., Sugiyama K.* Fragmentation of a Single Molten Metal Droplet Penetrating into Sodium Pool: Thermal and Hydrodynamic Effects on Fragmentation in Stainless Steel // Nucl. Technol. 2011. V. 175. P. 619.
149. *Zhang Z.G., Sugiyama K.* Fragmentation of a Single Molten Metal Droplet Penetrating into Sodium Pool. IV. Thermal and Hydrodynamic Effects on Fragmentation in Copper // J. Nucl. Sci. Technol. 2012. V. 49. P. 602.
150. *Epstein M.* Stability of a Submerged Frozen Crust // ASME J. Heat Transfer. 1977. V. 99. P. 527.
151. *Cooper F., Dienes J.* The Role of Rayleigh-Taylor Instabilities in Fuel-Coolant Interactions // Nucl. Sci. Eng. 1978. V. 68. P. 308.
152. *Uršič M., Leskovar M.* Modelling of Solidification Influence on Steam Explosion Efficiency in MC3D // Int. Conf. “Nuclear Energy for New Europe 2009”, Bled, Slovenia, September 14–17, 2009.
153. *Uršič M., Leskovar M., Mavko B.* Material Properties’ Influence in Fuel-Coolant Interaction Codes // J. Eng. Gas Turbines and Power. 2010. V. 132. Iss. 7. 072901.
154. *Ursic M., Leskovar M., Mavko B.* Improved Solidification Influence Modelling for Eulerian Fuel-Coolant Interaction Codes // Nucl. Eng. Design. 2011. V. 241. P. 1206.
155. *Ursic M., Leskovar M., Mavko B.* Simulations of KROTOS Alumina and Corium Steam Explosion Experiments: Applicability of the Improved Solidification Influence Modelling // Nucl. Eng. Design. 2012. V. 246. P. 163.
156. *Ursic M., Leskovar M.* Temperature Profile Modelling in Fuel-coolant Interaction Codes // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 5350.
157. *Ursic M., Leskovar M., Burger M., Buck M.* Hydrodynamic Fine Fragmentation of Partly Solidified Melt

Droplets During a Vapour Explosion // Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. V. 76. P. 90.
158. *Ursic M., Leskovar M., Meignen R.* Eulerian Modelling of Melt Solidification Impact During Fuel-Coolant Interaction // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 78. P. 130.
159. *Langford D.* The Freezing of Spheres // Int. J. Heat Mass Transfer. 1966. V. 9. № 8. P. 827.
160. *Schins H., Lamain L.* Break up Time of Fragmentating – Solidifying UO2 Spheres When Quenched in Sodium // Nucl. Eng. Design. 1984. V. 80. № 1. P. 19.
161. *Cronenberg A.W., Chawla T.C., Fauske H.K.* A Thermal Stress Mechanism for the Fragmentation on Molten UO2 upon Contact with Sodium Coolant // Nucl. Eng. Design. 1974. V. 30. № 3. P. 433.
162. *Corradini M., Todreas N.E.* Prediction of Minimum UO2 Particle Size Based on Thermal Stress Initiated Fracture Model // Nucl. Eng. Design. 1979. V. 53. № 1. P. 105.
163. *Cronenberg A.W.* Solidification Phenomena for UO_2, UC and UN Relative to Quenching in Sodium Coolant // Nucl. Eng. Design. 1976. V. 36. № 2. P. 261.
164. *Зейгарник Ю.А., Ивочкин Ю.П., Король Е.З.* Термомеханический механизм тонкой фрагментации жидких капель при паровом взрыве // ТВТ. 2004. Т. 43. № 3. С. 491.
165. *Dombrovsky L.A.* An Estimate of Stability of Large Solidifying Droplets in Fuel-Coolant Interaction // Int. J. Heat Mass Transfer. 2007. V. 50. P. 3832.
166. *Dombrovsky L.A., Dinh T.N.* The Effect of Thermal Radiation on the Solidification Dynamics of Metal Oxide Melt Droplets // Nucl. Eng. Design. 2008. V. 238. P. 1421.
167. *Dombrovsky L.A.* Steam Explosion in Nuclear Reactors: Droplets of Molten Steel vs Core Melt Droplets // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 107. P. 432.
168. *Meignen R., Picchi S., Lamome J., Raverdy B., Castrillon Escobar S., Nicaise G.* The Challenge of Modeling Fuel-Coolant Interaction: Part I – Premixing // Nucl. Eng. Design. 2014. V. 280. P. 511.
169. *Theofanous T.G., Chen X., Di Piazza P., Epstein M., Fauske H.K.* Ignition of Aluminum Droplets Behind Shock Waves in Water // Phys. Fluids. 1994. V. 6. P. 3513.
170. *Cho D.H., Armstrong D.R., Gunther W.H., Basu S.* Experiments on Interactions Between Zirconium-Containing Melt and Water (ZREX): Hydrogen Generation and Chemical Augmentation of Energetics // Proc. OECD/CSNI Specialists Meeting on Fuel-Coolant Interactions. NEA/CSNI/R(97)26, Part II, Tokai-Mura, Japan, 1997. P. 595.
171. *Cho D.H., Armstrong D.R., Gunther W.H., Basu S.* Experiments on Explosive Interactions Between Zirconium-Containig Melt and Water (ZREX) // Proc. 6th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-6). San Diego, USA, 1998.
172. *Cho D.H., Armstrong D.R., Gunther W.H.* Experiments on Interactions between Zirconium-containing Melt and Water. NUREG/CR-5372, 1998.
173. *Epstein M., Fauske H.K.* A Crystallization Theory of Underwater Aluminum Ignition // Nucl. Eng. Design. 1994. V. 146 P. 147.
174. *Epstein M., Fauske H.K., Theofanous T.G.* On the Mechanism of Aluminum Ignition in Steam Explosions // Nucl. Eng. Design. 2000. V. 201. P. 71.
175. *Corradini M.L., Farahani A., Uludogan A.* Chemical Assisted Vapor Explosions in a Shock Tube Geometry // Proc. Multidisciplinary International Seminar on Intense Multiphase Interactions. Santa Barbara, USA, 1995. P. 256.
176. *Мелихов О.И., Мелихов В.И., Ртищев Н.А., Тарасов А.Е.* Численное моделирование процесса выделения водорода при взаимодействии расплава циркония с водой // ТВТ. 2016. Т. 54. № 4. С. 553.
177. *Loisel V., Zambaux J.-A., Hadj-Achour M., Picchi S., Goidreau O., Meignen R.* Oxidation During Fuel-Coolant Interaction: Advances and Modeling // Nucl. Eng. 2019. V. 346. P. 200.
178. *Tyrpekl V., Piluso P.* Analysis of Material Effect in Molten Fuel-Coolant Interaction, Comparison of Thermodynamic Calculations and Experimental Observations // Ann. Nucl. Energy. 2012. V. 46. P. 197.
179. *Tyrpekl V., Piluso P., Bakardjieva S., Niznansky D., Rehspringer J.-L., Bezdicka P., Dugne O.* Prototypic Corium Oxidation and Hydrogen Release During the Fuel-Coolant Interaction // Ann. Nucl. Energy. 2015. V. 75. P. 210.
180. *Tyrpekl V., Piluso P., Bakardjieva S., Dugne O.* Material Effect in the Nuclear Fuel-Coolant Interaction: Analyses of Prototypic Melt Fragmentation and Solidification in the KROTOS Facility // Proc. Int. Meeting on Severe Accident Assessment and Management 2012: Lessons Learned from Fukushima Dai-ichi. San Diego California, November 11–15, 2012. P. 130.
181. *Tyrpekl V., Piluso P., Bakardjieva S., Dugne O.* Material Effect in the Nuclear Fuel-Coolant Interaction: Analyses of Prototypic Melt Fragmentation and Solidification in the KROTOS Facility // Nucl. Technol. 2014. V. 186. P. 229.
182. *Skobe T., Leskovar M.* Influence of Corium Composition on Ex-vessel Steam Explosion // Ann. Nucl. Energy. 2019. V. 133. P. 359.
183. *Brayer C., Le Monnier A., Chikni N.* Impact of Corium Thermophysical Properties on Fuel-Coolant Interaction // Ann. Nucl. Energy. 2020. V. 147. 107613.