

**В.И.МЕЛИХОВ, О.И.МЕЛИХОВ, С.Е.ЯКУШ**

**ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОФИЗИКА  
ПАРОВЫХ ВЗРЫВОВ**

**Москва  
ИПМех РАН  
2020**

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ЛИТЕРАТУРА

---

В. И. МЕЛИХОВ, О. И. МЕЛИХОВ, С. Е. ЯКУШ

# ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОФИЗИКА ПАРОВЫХ ВЗРЫВОВ



Москва  
ИПМех РАН  
2020

УДК 536.423:621.039

ББК 31.4

М47

*Издано при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ №18–19–00289 «Стратифицированный паровой взрыв при взаимодействии слоя высокотемпературного расплава с жидким теплоносителем».*

*Рецензенты:*

д.т.н., чл.-корр. РАН Н. А. Прибатурин

д.ф.-м.н., проф. В. Ф. Стрижов

Мелихов В. И., Мелихов О. И., Якуш С. Е. **Гидродинамика и теплофизика паровых взрывов** — М.: Издательство «ИПМех РАН», 2020. — 276 с. — ISBN 978-5-91741-259-7

В книге рассмотрены процессы, протекающие при взаимодействии высокотемпературных расплавов с жидкими охладителями. Приведен обзор основных стадий протекания паровых взрывов при тяжелых авариях на ядерных реакторах, включая предварительное перемешивание, инициирование (триггеринг) и собственно взрыв. Подробно освещена фрагментация струи расплава в глубоком бассейне за счет развития неустойчивости и срыва капель. Рассмотрены экспериментальные данные по паровым взрывам при растекании слоя расплава по дну мелкого бассейна с охладителем, изучены возможные механизмы возникновения области предварительного перемешивания. Рассмотрен возможный механизм взаимодействия за счет захвата пузырьков горячего пара недогретой жидкостью с возникновением кумулятивных струек, ударяющих по расплаву и вызывающих ответные всплески расплава. Рассмотрена теория термической детонации на основе адиабат Гюгонио для многофазной системы. Получены оценки долей участвующих во взрыве расплава и охладителя для стратифицированной конфигурации «расплав–вода» и определены параметры парового взрыва в условиях аварии на парогенераторе реактора со свинцовым теплоносителем.

Книга может представлять интерес для специалистов в области безопасности атомной энергетики, механики многофазных сред, гидродинамики и теплофизики, студентов и аспирантов.

ISBN 978-5-91741-259-7

© В.И.Мелихов, О.И.Мелихов,  
С.Е.Якуш, 2020

# Оглавление

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b>	<b>7</b>
<b>1. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВА С ОХЛАДИТЕЛЕМ</b>	<b>11</b>
1.1. Паровые взрывы в природе и техногенной сфере . . . . .	11
1.2. Сценарии взаимодействия расплава с водой при тяжелых авариях на АЭС . . . . .	14
1.3. Концептуальная схема протекания крупномасштабного парового взрыва . . . . .	19
1.4. Краткий обзор экспериментальных исследований парового взрыва . . . . .	23
1.4.1. Эксперименты Сандийской национальной лаборатории (США) . . . . .	23
1.4.2. Эксперименты FARO (JRC Ispra, Италия) . . . . .	28
1.4.3. Эксперименты KROTOS (JRC Ispra, Италия) . . . . .	32
1.4.4. Эксперименты TROI (Южная Корея) . . . . .	39
1.4.5. Эксперименты ФЭИ (РФ) . . . . .	47
1.4.6. Эксперименты НПО «Луч» (СССР) . . . . .	48
1.4.7. Основные выводы по экспериментам . . . . .	49
1.5. Пленочное кипение в проблеме парового взрыва . . . . .	50
Литература к главе 1 . . . . .	73
<b>2. ФРАГМЕНТАЦИЯ СТРУИ РАСПЛАВА В ОХЛАДИТЕЛЕ</b>	<b>81</b>
2.1. Режимы дробления . . . . .	81
2.2. Линейный анализ устойчивости струи . . . . .	87
2.2.1. Устойчивость поверхности струи . . . . .	87

2.2.2.	Фрагментация струй расплава в условиях тяжелой аварии . . . . .	95
2.2.3.	Устойчивость струи расплава, окруженной пленкой пара, в воде . . . . .	96
2.3.	Длина распада струи расплава в условиях пленочного кипения . . . . .	110
2.3.1.	Корреляции для длины распада струи . . . . .	110
2.3.2.	Сравнение моделей распада струи с экспериментом	120
	Литература к главе 2 . . . . .	122
<b>3.</b>	<b>ПЕРЕМЕШИВАНИЕ РАСПЛАВА С ОХЛАДИТЕЛЕМ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ КОНФИГУРАЦИИ</b>	<b>127</b>
3.1.	Два механизма перемешивания расплава с охладителем для стратифицированных паровых взрывов . . . . .	127
3.2.	Синхронный механизм перемешивания при стратифицированном паровом взрыве . . . . .	136
3.3.	Перемешивание вследствие коллапса паровых пузырьков на поверхности раздела . . . . .	143
3.3.1.	Конденсация пузырька перегретого пара в недогретой воде . . . . .	144
3.3.2.	Влияние начального перегрева пара на динамику процесса . . . . .	160
3.3.3.	Вычисление кинетической энергии жидкости . . . . .	163
3.3.4.	Воздействие воды на поверхность расплава при коллапсе парового пузырька . . . . .	169
3.4.	Сопоставление двух механизмов перемешивания при стратифицированном паровом взрыве . . . . .	197
	Литература к главе 3 . . . . .	198
<b>4.</b>	<b>МЕТОД АДИАБАТ ГЮГОНИО ДЛЯ АНАЛИЗА ПАРОВОГО ВЗРЫВА</b>	<b>203</b>
4.1.	Детонация горючих газовых смесей . . . . .	204
4.2.	Детонация многофазных смесей . . . . .	207
4.3.	Исследование термической детонации в системе «жидкий свинец–пароводяная смесь» методом адиабат Гюгонио	215
4.3.1.	Постановка задачи и математическая модель . . . . .	215

---

4.3.2.	Процедура построения адиабаты Гюгонио . . . . .	218
4.3.3.	Валидация расчетной программы . . . . .	220
4.3.4.	Параметрический анализ для смеси «свинец– пар–вода» . . . . .	229
4.3.5.	Оценка работы расширения для парогенератора .	239
4.3.6.	Возможность применения метода «частичных» адиабат . . . . .	242
4.4.	Определение параметров стратифицированного парово- го взрыва методом адиабат Гюгонио . . . . .	244
4.4.1.	Модель «частичных» адиабат . . . . .	246
4.4.2.	Метод решения . . . . .	255
4.4.3.	Свойства расплава и охладителя . . . . .	255
4.4.4.	Анализ стратифицированного парового взрыва методом «частичных» адиабат Гюгонио . . . . .	256
	Литература к главе 4 . . . . .	265
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>271</b>



# ПРЕДИСЛОВИЕ

Быстрые фазовые переходы, в ходе которых происходит резкое увеличение удельного объема системы, встречаются в различных областях техники, в природных явлениях. Как правило, они являются результатом неконтролируемого выделения энергии и контакта высокотемпературных материалов с легко вскипающими жидкостями.

С точки зрения классической термодинамики, фазовый переход первого рода представляет собой изменение агрегатного состояния вещества, происходящее в определенных точках на диаграмме «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. 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 расплав материалов активной зоны энергетического реактора и вода или натрий) при определенных условиях возникает быстрое вскипание холодной жидкости, сопровождающееся резким ростом давления и быстрым расширением зоны их термического взаимодействия. Это явление, получившее название «паровой взрыв» (в англоязычной литературе — steam explosion, vapor explosion), представляет значительную опасность, поскольку может приводить к существенным динамическим воздействиям на конструкции реактора и контейнента и создавать угрозу их целостности. В связи с возможным выходом радиоактивных продуктов деления в атмосферу и вызванными этим грядущими катастрофическими последствиями, данное явление активно изучается в ведущих мировых исследовательских центрах, специализирующихся в области безопасности атомной энергетики.

Изучение паровых взрывов находится на стыке многих наук, как фундаментального, так и прикладного плана. Протекающие процессы теплопередачи и фазовых превращений в условиях существенной нестационарности, фрагментации участвующих во взаимодействии жидкостей, развитии неустойчивостей различного типа, сложны для экспериментального изучения и теоретического описания. В них в полной мере проявляются неопределенности — как внутренне присущие, обусловленные стохастичностью протекающих процессов, так и модельные, связанные с неполнотой знаний и невозможностью описать явления исходя из «первых принципов». Схожие проблемы присутствуют и в других областях знания — турбулентности, многофазных течениях, горении и взрыве. Соответственно, имеющиеся на сегодняшний день публикации по проблеме быстрых фазовых переходов и паровых взрывов включают как работы фундаментального плана, нацеленные на выявление тонких особенностей протекающих процессов, и работы более инженерной направленности, в которых во главе угла стоит оценка (за-

частую — оценка сверху с той или иной долей консервативности) интегральных характеристик взрывов для целей обоснования безопасности тех или иных технических решений или надежности систем безопасности.

Литература по паровым взрывам достаточно обширна, однако многие результаты содержатся в зарубежных отчетах, в том числе труднодоступных для отечественного читателя. В настоящее время тематика парового взрыва практически не отражена в отечественных монографиях. В какой-то мере предлагаемая книга призвана устранить этот пробел, систематизировать сведения о паровых взрывах, отметить основные достижения в данной области и направления дальнейшего развития исследований. В то же время, данная монография не претендует на энциклопедичность, отражая область долговременных научных интересов авторов — развитие математических моделей многофазных течений и их применение к численному анализу паровых взрывов, явлений в тепловыделяющих пористых средах, теоретическому исследованию физических взрывов различной природы. Более фрагментарно затронуты экспериментальные исследования паровых взрывов, представляющие собой самостоятельную, обширную и важную тему, достойную отдельной монографии. Не затронуты и компьютерные коды (общего назначения и специализированные), находящие все более широкое применение для анализа многофазных теченийю.

В настоящей книге основное внимание уделяется взаимодействию высокотемпературного расплава материалов активной зоны с охладителем в ходе тяжелой аварии на АЭС. В *первой главе* рассмотрены основные физические процессы, сопровождающие возникновение условий для взрывного превращения тепловой энергии расплава в механическую при резком выделении пара вскипающей жидкости, собственно взрыв, и расширение возникающей смеси. *Вторая глава* книги посвящена обзору моделей фрагментации струи жидкого расплава, проникающего в глубокий слой охладителя. Рассмотрены модели различного уровня, от линейной теории устойчивости струй до инженерных соотношений для длины распада струи, сравниваемых с экспериментальными данными. В *третьей главе* проанализированы возможные механизмы возникновения зоны предварительного перемешивания в стратифицированной конфигурации, при растекании слоя расплава по дну

мелкого бассейна с охладителем. Наконец, в *четвертой главе* представлено описание паровых взрывов с позиций теории термической детонации на основе адиабат Гюгонио для многофазной системы. Описана модель «частичных» адиабат, учитывающая существенную неоднородность многофазной среды и протекание взрывного превращения энергии в ограниченных фрагментах смеси. На основе количественных расчетов получены оценки долей участвующих во взрыве расплава и охладителя для стратифицированной конфигурации «расплав–вода» и определены параметры парового взрыва в условиях аварии на парогенераторе реактора со свинцовым теплоносителем. *Заключение* книги содержит основные выводы, формулировку направлений дальнейших исследований, а также краткий обзор тематик, которые не вошли в данную монографию, но представляют несомненный интерес, фундаментальную и прикладную ценность.

Авторы выражают признательность своим коллегам и соавторам, общение с которыми на различных этапах способствовало формированию научного взгляда на проблему и реализации возникающих идей. Авторы искренне благодарны рецензентам за конструктивную критику и ценные замечания.

Издание осуществлено при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ №18-19-00289 «Стратифицированный паровой взрыв при взаимодействии слоя высокотемпературного расплава с жидким теплоносителем».

## Глава 1

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАСПЛАВА С ОХЛАДИТЕЛЕМ

### 1.1. Паровые взрывы в природе и техногенной сфере

В атомной отрасли было зафиксировано несколько случаев взаимодействия расплавленного топлива с охладителем на исследовательских реакторах [1, 2]. Первый произошел в 1952 году на канадском реакторе NRX, он был вызван нарушением в системе управления и защиты реактора, что привело к расплавлению топлива и последующему взаимодействию урана с водой/паром, в результате были повреждены трубы, обеспечивающие теплоизоляцию между нагретым теплоносителем и холодным замедлителем. Было сделано предположение, что в результате взаимодействия урана с водой выделился водород и затем произошел взрыв, образовавшейся гремучей смеси (водород–воздух). После этой аварии разрушительный эксперимент произошел в реакторе с кипящей водой BORAX в 1954 году. В этом эксперименте большинство топливных пластин расплавилось из-за повышения мощности, вызванного удалением управляющего стержня, и после контакта расплава с водой реакторный сосуд разрушился из-за повышения давления, которое бы-

ло оценено  $> 40$  МПа. Привод управляющего стержня, весящий около 1 т, был подброшен вверх на 9 метров. В этом случае было сделано заключение, что природа взрыва была тепловой, никаких свидетельств наличия химической реакции обнаружено не было. Последующий анализ показал, что произошла значительная фрагментация топлива.

Серьезная авария, в ходе которой произошел взрыв на исследовательском военном реакторе SL-1, произошла 3 января 1961 года. Из-за удаления управляющего стержня произошло повышение мощности, которое частично расплавilo топливный элемент. Расплавленное топливо перемешалось с окружающей водой, что привело к возникновению парового взрыва с давлением около 70 МПа. Сосуд реактора подскочил на три метра, все соединительные трубы были разрушены, заглушки управляющего стержня были подброшены вверх и вонзились в потолок. Было зафиксировано два смертельных случая из-за воздействия взрывной волны и один смертельный случай, вызванный воздействием радиации и летящих осколков. Расследование показало, что механические воздействия были результатом парового взрыва при контакте расплавленного топлива с водой, мощность которого составила примерно 1% от полной выделившейся в реакторе энергии. Значительные величины давлений, наблюдавшиеся в этой аварии, привели к необходимости проведения экспериментальных исследований для изучения механизма взаимодействия расплава с охладителем.

В 1962 году был произведен разрушительный эксперимент на реакторе SPERT (Idaho, USA) с повышением мощности до 2300 МВт. При этом измеренное давление составило 27 МПа, примерно 35% активной зоны было расплавлено, все 270 топливных пластин были в той или иной степени расплавлены. Последующий анализ показал, что примерно 20 кг металла фрагментировало, размеры фрагментов составили от  $\sim 1$  мм до нескольких сантиметров. Был сделан вывод о том, что в эксперименте вследствие контакта расплавленного металла с водой произошел паровой взрыв.

Необходимо отметить, что все описанные выше взрывы произошли вследствие роста мощности, и что во всех случаях топливо было металлическим (U или сплав U-Al), а охладителем являлась вода.

Паровые взрывы также происходили в металлургической и бумажной промышленности и при транспортировке сжиженного газа. В [3]

сообщается о случаях попадания расплавленной стали на влажную поверхность или в бассейн с водой, сопровождавшихся значительными разрушениями. В [4] приведены другие примеры взрывов при взаимодействии расплавленных металлов с водой. В одном случае загрузка мокрого лома алюминия в печь привело к взрыву, приведшему к гибели 6 человек, 4 человека были ранены, а стоимость поврежденного имущества составила 1 миллион долларов США. Крупный паровой взрыв произошел на литейном заводе Appleby–Frodigham Steelworks (Великобритания) в 1975 году [5, 6], где 90 тонн расплавленного металла были разбросаны по значительной поверхности после взаимодействия  $2.2 \text{ м}^3$  воды с 180 т жидкого металла, находившегося в контейнере. Четыре человека погибли мгновенно во время взрыва, в конечном итоге 11 человек скончались от полученных увечий.

На одном из этапов производства бумаги горячий расплав ( $800\text{--}850^\circ\text{C}$ ), состоящий в основном из карбоната натрия ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) и сульфида натрия ( $\text{Na}_2\text{S}$ ), а также с небольшими добавками сульфата натрия ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), хлорида натрия ( $\text{NaCl}$ ) и солей калия, дробится струей пара на мелкие капли, которые падают в сосуд с водой и растворяются. Технология требует использования больших масс расплава, поэтому этот процесс весьма опасный. Сосуд, в котором происходит растворение расплава постоянно грохочет, вызывая колебания окружающих сооружений, при определенных условиях возможно возникновение взрыва [7–10]. На протяжении последних 30 лет ежегодно сообщается по крайней мере об одном взрыве на таком производстве в Северной Америке.

Сжиженный природный газ, транспортируемый танкерами, имеет крайне низкую температуру (при атмосферном давлении газ ожигается при  $t = -161.5^\circ\text{C}$ ), поэтому в случае аварийного нарушения герметичности грузовой емкости танкера происходит взаимодействие «холодного» жидкого газа с окружающей «горячей» морской водой (средняя температура  $15^\circ\text{C}$ ), в результате передачи огромного количества энергии от воды к газу жидкий газ быстро переходит в газообразное состояние [11–13]. В этом случае основная опасность состоит в возможности возгорания при перемешивании газа с воздухом. Отметим, что в этой технической области вместо термина «паровой взрыв» используется термин «быстрое фазовое превращение» (rapid phase transition).

## Глава 3

# ПЕРЕМЕШИВАНИЕ РАСПЛАВА С ОХЛАДИТЕЛЕМ В СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ КОНФИГУРАЦИИ

### 3.1. Два механизма перемешивания расплава с охладителем для стратифицированных паровых взрывов

При стратифицированной конфигурации расплава и охладителя слой расплава находится под охладителем. Такое расположение возникает если струя расплава вливается в бассейн с охладителем, и при этом длина ее фрагментации значительно больше глубины охладителя (рис. 3.1). Стратифицированная конфигурация также образуется если расплав попадает в первоначально сухое помещение, после чего он заливается охладителем (рис. 3.2).

Стратифицированная конфигурация расплава с водой не воспринималась, как представляющая угрозу с точки зрения возможности произвести сильные паровые взрывы. Такой вывод основывался на ряде

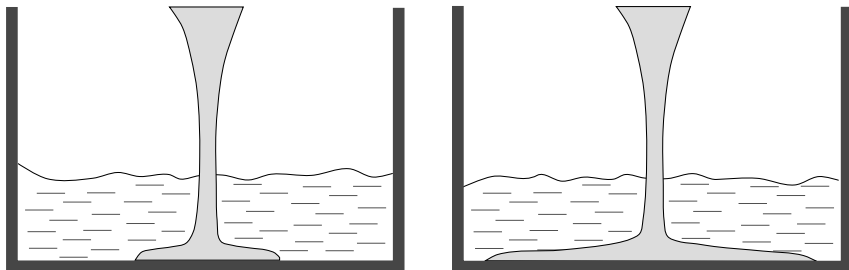


Рис. 3.1. Пролив расплава в бассейн с мелким слоем охладителя.

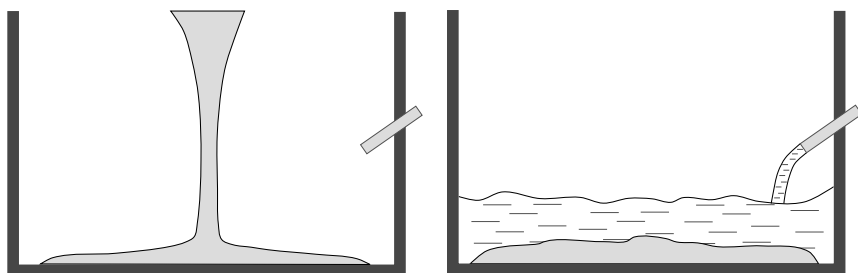


Рис. 3.2. Пролив расплава в сухой бассейн с последующей заливкой охладителем.

аналитических оценок, которые базировались на ключевой гипотезе, предложенной Харлоу и Раппелем [1] (рис. 3.3), и подкреплялся результатами экспериментов с низкотемпературными жидкостями [2–10].

В работе [1] был предложен механизм самоподдерживающейся взрывной волны в стратифицированной системе расплава с охладителем. Согласно ему охладитель, получив тепло от расплава в зоне взрыва, в которой расплав и охладитель находятся в виде перемешанной смеси, начинает интенсивно вскипать и расширяться, повышая давление, что приводит к возникновению и распространению по расплаву и по охладителю ударных волн. На поверхности раздела с паровым слоем ударные волны преломляются, движутся по пару и, дойдя до противоположной поверхности раздела, воздействуют на нее. В результате развивается неустойчивость Рэлея-Тейлора, приводящая к перемешиванию расплавов с охладителем. Таким образом, зона перемешанной смеси образуется во время взрывного взаимодействия, и поэтому,



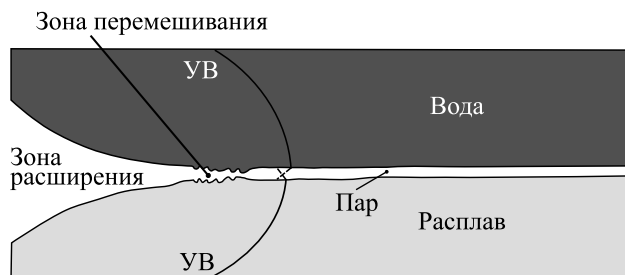


Рис. 3.3. Схема развития стратифицированного парового взрыва, предложенная Харлоу и Раппелем [1] (УВ — ударная волна).

ввиду высокой скорости взрывной волны, она не успевает вырасти до больших размеров, при которых паровые взрывы становятся опасными. Поскольку перемешанная смесь расплава и охладителя образуется синхронно с распространением взрывной волны, то механизм перемешивания в этом случае можно назвать *синхронным*, в отличие от «обычных» паровых взрывов, в которых перемешанная смесь образуется до возникновения взрывной волны.

С 1981 года этот механизм является общепризнанным, на что указывается, например, в работе [11], в которой отмечается, что при стратифицированной конфигурации расплава и охладителя отсутствует первоначальная стадия их предварительного перемешивания. При этом полагается, что распространение волн давления по охладителю и расплаву вызывает их перемешивание и фрагментацию.

Более детальные обсуждения аналитических моделей, используемых при оценках энергетики стратифицированных паровых взрывов, содержатся в [12–14].

Как уже отмечалось, экспериментальные данные по стратифицированным паровым взрывам получены в основном для низкотемпературных жидкостей [2–10]. В этих экспериментах действительно были получены низкие коэффициенты конверсии и медленные скорости детонационных волн. Детальный обзор этих работ содержится в [15, 12]. В таблице 3.1 приведены справочные сведения о выполненных экспериментальных исследованиях паровых взрывов при стратифицированной конфигурации расплава и охладителя.

Прежде всего, интересно отметить, что гипотеза, выдвинутая Харлоу и Раппелем [1], оказала влияние на экспериментальные исследования, выполненные с низкотемпературными жидкостями. Возможное образование перемешанного слоя расплава и охладителя перед взрывом было не в фокусе этих работ, хотя неустойчивости поверхности раздела отмечались в нескольких публикациях [2, 3, 5–8], при этом они рассматривались как нежелательные и ведущие к несогласованным результатам [5].

В некоторых экспериментах с низкотемпературными жидкостями перед взрывом фиксировалось развитие спонтанной неустойчивости поверхности раздела и образование перемешанного слоя. Иногда экспериментаторы интенсивно подавляли неустойчивости, чтобы избежать «усложнений, связанных с перемешиванием», и чтобы обеспечить «лучшее контролирование параметров экспериментов», и чтобы «улучшить визуализацию» [6]. В нескольких экспериментах [11] после «затухания» начального триггерного возмущения наблюдались вторичные спонтанные взаимодействия.

В статье [10] отмечается, что начальное затухающее возмущение, видимо, производит достаточное перемешивание, которое увеличивает скорость распространения и максимальное давление при последующем вторичном взаимодействии расплава с охладителем.

Как следует из обзора работ [15], исследования парового взрыва при стратифицированной конфигурации расплава с охладителем в основном проводились с использованием низкотемпературных жидкостей, при этом исследователи стремились обеспечить поверхность раздела стабильной. Эксперименты с высокотемпературными расплавами в основном ориентировались на исследования взаимодействия расплава с бетоном и последующего медленного затопления слоя расплава водой или на исследования растекания расплава по днищу в отсутствие воды или при наличии очень тонкого слоя воды [16–20]. Таким образом, предположение об устойчивости поверхности раздела расплава с охладителем не было в достаточной мере валидировано в условиях, близких к реакторным.

## Глава 4

# МЕТОД АДИАБАТ ГЮГОНИО ДЛЯ АНАЛИЗА ПАРОВОГО ВЗРЫВА

В 1975 году была впервые сформулирована аналогия [1] между распространением волны детонации по смеси топлива с охладителем и волной детонации в химически реагирующей среде, механизм которой достаточно хорошо изучен и развит соответствующий математический аппарат [2, 3]. Роль экзотермической химической реакции, высвобождающей энергию среды, в случае смеси топлива и охладителя играет процесс фрагментации расплава, благодаря которому существенно увеличивается площадь межфазной поверхности и, тем самым, резко возрастает интенсивность передачи тепловой энергии расплава к охладителю.

В настоящем разделе монографии будут подробно изложены исследования в этой области, но предварительно, для лучшего понимания материала, приводятся основные положения теории химической детонации, а именно — детонации горючих газовых смесей.

## 4.1. Детонация горючих газовых смесей

При медленном горении газовых смесей распространение фронта горения осуществляется прогревом холодного слоя газа теплом из зоны горения, передаваемым за счет теплопроводности, и его последующим воспламенением. В отличие от медленного горения при детонации нагрев холодного слоя газа происходит под действием ударной волны, которая воспламеняет газ. Поэтому скорость распространения детонации гораздо быстрее, чем при медленном горении. Таким образом, детонационная волна представляет собой лидирующую ударную волну, вслед за которой движется слой горящего газа.

В системе координат, в которой детонационная волна неподвижна, на нее набегают исходная горючая газовая смесь. Ударная волна представляет собой поверхность разрыва, на которой скачком изменяются параметры потока. Ударная волна сжимает входящую в нее горючую газовую смесь — давление и температура смеси повышаются, и она воспламеняется. Затем в некоторой области за ударной волной протекает химическая реакция горения.

На фронте ударной волны непрерывны плотности потоков массы, импульса и энергии. Обозначая нижним индексом 0 параметры исходной смеси газов, а нижним индексом 1 — параметры смеси непосредственно за фронтом ударной волны, получим следующие уравнения, выражающие непрерывность потоков массы, импульса и энергии на поверхности разрыва:

$$\rho_1 u_1 = \rho_0 u_0 = j, \quad (4.1)$$

$$p_1 + \rho_1 u_1^2 = p_0 + \rho_0 u_0^2, \quad (4.2)$$

$$h_1 + \frac{1}{2} u_1^2 = h_0 + \frac{1}{2} u_0^2. \quad (4.3)$$

Здесь  $\rho$  — плотность,  $p$  — давление,  $u$  — скорость,  $h$  — удельная энтальпия,  $j$  — плотность потока массы газа, которая сохраняется на поверхности разрыва.

Из уравнений (4.1) и (4.2) следует выражение для плотности потока массы

$$j^2 = \frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1}, \quad (4.4)$$

где  $v$  — удельный объем газа.

Из трех уравнений сохранения (4.1)–(4.3) можно получить следующее соотношение:

$$h_0 - h_1 + \frac{1}{2} (v_0 + v_1) (p_1 - p_0) = 0. \quad (4.5)$$

Соотношение (4.5) устанавливает связь между термодинамическими величинами по обе стороны поверхности разрыва. Поскольку энтальпия — функция состояния, то она определяется значениями, например, давления и удельного объема  $h = h(p, v)$ . В частности,  $h_1 = h(p_1, v_1)$ . Поэтому соотношение (4.5) определяет зависимость давления на ударной волне  $p_1$  от удельного объема на ударной волне  $v_1$  при заданных начальных параметрах газа. Эта зависимость  $p_1(v_1)$  называется ударной адиабатой.

Структура детонационной волны схематически показана на рис. 4.1, где приведены основные зоны в системе координат, связанной с ударной волной (УВ). Стационарная детонационная волна представляет собой структуру с лидирующей ударной волной, поджигающей газовую смесь, зоной горения и следующей за ней областью расширения продуктов горения. Из приведенных выше соотношений следует, что параметры газа на ударной волне определяются ударной адиабатой. Газовая смесь, подогретая ударной волной, воспламеняется и сгорает в некоторой области за ударной волной (зона химической реакции или зона горения).

Состояние газа в плоскости CJ, разделяющей зону горения и область расширения продуктов горения (см. рис. 4.1), определяется из законов сохранения плотностей потоков массы, импульса и энергии. Поскольку в этой плоскости также справедливы уравнения (4.1)–(4.3), то на ней выполняется уравнение адиабаты (4.5). Для параметров в этой плоскости не будем использовать индексы, тогда уравнение адиабаты для этой плоскости (детонационной адиабаты или адиабаты Гюгонио) запишется в следующем виде:

$$h_0 - h + \frac{1}{2} (v_0 + v) (p - p_0) = 0. \quad (4.6)$$

Уравнения ударной адиабаты (4.5) и адиабаты Гюгонио (4.6) выглядят одинаково, тем не менее, адиабаты, построенные в соответствии с

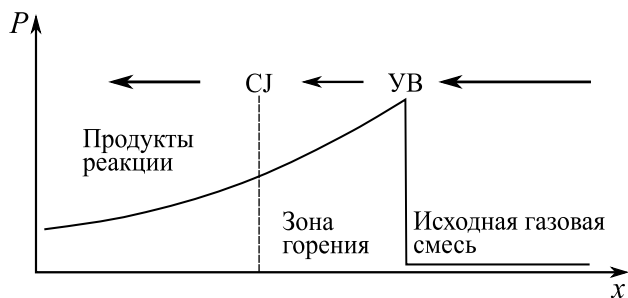


Рис. 4.1. Структура детонационной волны в системе координат, связанной с ударной волной (УВ). Штриховой линией показана плоскость Чепмена-Жуге (СЖ).

этим уравнениями, существенно отличаются. Это связано с тем, что газ в плоскости, разделяющей зону горения и продукты горения, отличается по химическому составу от исходного газа. Соответственно, энтальпия этого газа будет уже другой функцией давления и удельного объема  $h(p, v)$ .

На рис. 4.2 на плоскости «удельный объем–давление» показана точка 0, описывающая состояние исходной газовой смеси, из этой точки исходит ударная адиабата (4.5), точки которой изображают параметры газа на ударной волне. Над ударной адиабатой расположена детонационная адиабата (4.6) (адиабата Гюгонио). На ударной волне система претерпевает скачок параметров и из исходного состояния (точка 0) переходит в некоторую точку 1 на ударной адиабате. В теории детонации доказывается, что дальнейшая эволюция газовой смеси в зоне горения описывается точками на отрезке прямой 1–2, и в точке 2, находящейся на детонационной адиабате, горение заканчивается [3], при этом нижняя точка 2' пересечения прямой 0–1 с детонационной адиабатой оказывается недостижимой.

Как следует из формулы (4.4), наклон прямой 0–1 выражает массовую скорость горения в детонационной волне и, соответственно, скорость самой детонационной волны.

Таким образом, уравнения сохранения допускают множество состояний газовой смеси на выходе из зоны горения детонационной волны, параметры которых расположены на детонационной адиабате [3]. Од-

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящая монография посвящена физическим основам парового взрыва, в ней были изложены основные представления о ключевых процессах, реализация которых создает условия и приводит к возникновению быстрой трансформации тепловой энергии расплава в механическую работу расширения продуктов взрыва. Многие явления, возникающие при паровом взрыве, удивительно красивы и неожиданны. В качестве примера можно вспомнить синхронный механизм перемешивания расплава с охладителем в их стратифицированной конфигурации. В этом случае волны давления из взрывной зоны проникают в исходную систему и «организуют» перемешивание компонент взрыва, подготавливая дальнейшее распространение взрывной волны.

Наличие высокотемпературного расплава рядом с водяным паром и водой приводит к образованию редко встречающегося объекта — пузырька перегретого пара в недогретой воде. Оказывается, что такой пузырек ведет себя как кавитационный — стремительно схлопывается, производя мощную струйку воды, «выстреливающую» в расплав, извергая из него брызги, как колесо автомобиля, проезжающего лужу. Эксперименты показывают, что небольшого отрезка времени, когда брызги расплава оказываются в воде, достаточно для реализации мощного парового взрыва.

Техника адиабат Гюгонио давно зарекомендовала себя эффективным методом оценок энергетических характеристик химических взрывов. Применение этого метода в теории парового взрыва позволило, не прибегая к исследованию сложных детальных механизмов фрагментации расплава и его теплообмена с охладителем, получить ясные представления о важных особенностях взрывного термического взаимодей-

ствия для системы «жидкий свинец–вода» и для случая стратифицированной конфигурации расплава с охладителем.

Пленочное кипение, то есть теплообмен нагретой поверхности с жидкостью через паровую пленку, прилегающую к этой поверхности, в теории парового взрыва играет исключительную роль не только как стабилизирующий фактор существования перемешанной смеси расплава с охладителем, ограничивающий скорость теплоотвода от расплава, но и механизм, влияющий на устойчивость системы «расплав–пар–жидкий охладитель», в частности — на фрагментацию струи расплава в охладителе.

Все эти вопросы были изложены в настоящей книге. Однако для практики недостаточно понимания закономерностей исследуемых процессов, конструкторам и проектантам промышленных установок, в первую очередь, АЭС требуются расчетные инструменты, позволяющие точно оценить последствия парового взрыва в многообразных индустриальных ситуациях. Для этого разрабатываются специальные расчетные коды, реализующие численными методами математические модели термического взаимодействия расплавов и охладителей в конкретных промышленных условиях.

Такие расчетные коды стали создаваться на рубеже 80-х–90-х годов XX века в связи с необходимостью выполнения анализов безопасности АЭС при тяжелых авариях с плавлением активной зоны ядерного реактора. Для их создания использовался уже существовавший математический аппарат механики многофазных сред (многожидкостный подход). Наполнение этих кодов «физикой» многофазных процессов, реализующихся при термическом взаимодействии, то есть описанием межфазного взаимодействия (фрагментация струи расплава в охладителе, распад капель расплава в среде двухфазного охладителя на несколько капель меньшего размера или, наоборот, тонкая фрагментация капель расплава на множество мелких фрагментов, различные формы теплопередачи от расплава в охладитель, межфазное трение, режимы течения многофазной среды и т.п.) началось с момента их появления и продолжается до настоящего времени. При этом используются результаты многочисленных исследований двухфазных течений и специальных, как правило, международных научных экспериментальных программ, посвященных



изучению термического взаимодействия расплава с охладителем, таких как KROTOS, FARO, TROI.

Разработка подобных «многофазных» кодов потребовала решения ряда принципиальных вопросов, одним из которых явилась дилемма между эйлеровым и лагранжевым подходами к описанию рассматриваемых процессов. На начальных этапах разработки многофазных кодов расплав моделировался с помощью одной или более (в случае отдельного описания твердых частиц) эйлеровых фаз. При этом расплав может быть как сплошным, так и дисперсным, в зависимости от его локальной объемной доли.

Однако данный подход достаточно сложно применять для различных конфигураций, возникающих на стадии перемешивания расплава и охладителя, которые включают в себя следующие составляющие:

- непрерывная фаза (как правило, струя),
- крупные капли расплава (от 1 мм до нескольких см), наиболее важная часть расплава с точки зрения развития парового взрыва,
- мелкие частицы (затвердевшие,  $\sim 100$  мкм), образующиеся при дроблении крупных капель, которые находятся в квазиравновесном состоянии с водой во время перемешивания,
- крупные затвердевшие частицы, они не участвуют во взрыве, но влияют на теплообмен,
- пористая структура, которая образуется после завершения взаимодействия расплава с водой.

Описание этих конфигураций представляет собой трудную задачу, и на сегодняшний день ни в одном коде они все вместе не моделируются.

Однако, увеличение количества фаз может быть не самым правильным решением для адекватного описания исследуемого процесса, поскольку оно существенно усложняет структуру кода. Многие разработчики идут по пути упрощения такого сложного подхода, применяя разные способы:

- лагранжево описание крупных частиц,
- введение отдельной сплошной фазы для струи и частично для пористой структуры,

- введение специальной фазы для мелких частиц расплава, находящихся в равновесии с водой,
- разделение расплавленного и затвердевшего топлива (для эйлера описания).

В ряде кодов для описания динамики струи не вводится специальная фаза, а используется карта режимов течения многофазной смеси, когда одна и та же фаза описывает в зависимости от режима течения, как капли расплава, так и струю расплава.

Для всех исследователей очевидна важность точного описания поведения расплава. Однако имеющее место существенное различие в подходах к этому описанию дает повод для дискуссии относительно того какие физические процессы требуют первоочередного детального описания, а какие допускают упрощенного моделирования, в частности, надо ли моделировать сплошную фазу расплава или нет.

Эти и многие другие важные вопросы создания расчетных кодов для моделирования паровых взрывов в промышленных объектах предполагалось осветить в настоящей монографии. Однако объем материала оказался слишком большим, поэтому авторы приняли решение написать отдельную книгу на эту тему, а настоящее заключение можно рассматривать как мостик к будущей монографии.

*Научное издание*

МЕЛИХОВ Владимир Игорьевич  
МЕЛИХОВ Олег Игорьевич  
ЯКУШ Сергей Евгеньевич

# **ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОФИЗИКА ПАРОВЫХ ВЗРЫВОВ**

Оригинал-макет: В.И. Мелихов, О.И. Мелихов, С.Е. Якуш

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН)  
119526 Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1  
<http://www.ipmnet.ru/>

Подписано в печать 01.12.2020.  
Формат 60×84/16.  
Times New Roman. Усл.печ.л. 17,25  
Тираж 300 экз. Заказ № 1849  
Отпечатано в типографии «AliceGroup»  
105094, Россия, Москва,  
Семеновская Набережная д.3/1 корпус 6,  
подъезд 8, этаж 1, офис 1  
Тел.: +7(999) 869-23-77  
[www.alicegroup.ru](http://www.alicegroup.ru)

Рассмотрены процессы, протекающие при взаимодействии высокотемпературных расплавов с жидкими охладителями. Приведен обзор основных стадий протекания паровых взрывов при тяжелых авариях на ядерных реакторах, включая предварительное перемешивание, инициирование (триггеринг) и собственно взрыв. Подробно освещена фрагментация струи расплава в глубоком бассейне за счет развития неустойчивости и срыва капель. Рассмотрены экспериментальные данные по паровым взрывам при растекании слоя расплава по дну мелкого бассейна с охладителем, изучены возможные механизмы возникновения области предварительного перемешивания. Рассмотрен возможный механизм взаимодействия за счет захвата пузырьков горячего пара недогретой жидкостью с возникновением кумулятивных струек, ударяющих по расплаву и вызывающих ответные всплески расплава. Рассмотрена теория термической детонации на основе адиабат Гюгоню для многофазной системы. Получены оценки долей участвующих во взрыве расплава и охладителя для стратифицированной конфигурации «расплав–вода» и определены параметры парового взрыва в условиях аварии на парогенераторе реактора со свинцовым теплоносителем.

Книга может представлять интерес для специалистов области безопасности атомной энергетики, механики многофазных сред, гидродинамики и теплофизики, студентов и аспирантов.



ISBN 978-5-91741-259-7

