

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ  
И АТОМНОМУ НАДЗОРУ  
(РОСТЕХНАДЗОР)

Федеральное бюджетное учреждение  
«Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»  
ФБУ «НТЦ ЯРБ»

---

*И. П. Соколов, А. В. Понизов, Р. Б. Шарафутдинов*

**НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ  
ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

**Труды «НТЦ ЯРБ»**

**Москва, 2023**

УДК 621.039

ББК 31.4

С 59

Соколов И. П., Понизов А. В., Шарафутдинов Р. Б. **Нормативное обеспечение взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла** / Труды «НТЦ ЯРБ». – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2023. – 364 с.: ил.

**Рецензент:** доктор технических наук А. Б. Коростелев

В книге систематизированы сведения по нормативному регулированию взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла (ОЯТЦ), обязательным требованиям по обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ, рекомендациям по выполнению обязательных требований по обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ, физико-химическому обоснованию обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ, основным понятиям, относящимся к взрывоопасности ОЯТЦ, показателям и характеристикам пожаровзрывоопасности веществ и материалов, применяемых на ОЯТЦ, специфике аварийных взрывов на ОЯТЦ.

Книга предназначена для обеспечения научно-технической поддержки специалистов по надзору за ядерной и радиационной безопасностью, а также для специалистов, обеспечивающих безопасность ОЯТЦ, студентов и аспирантов, изучающих вопросы обеспечения безопасности ОЯТЦ.

**УДК 621.039**

**ББК 31.4**

ISBN 978-5-907011-50-2

© ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2023

## Содержание

Список сокращений .....	8
Введение .....	10
<b>Часть 1. Специфика взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла.....</b>	<b>12</b>
<b>Глава 1. Физико-химические основы взрывчатых превращений .....</b>	<b>12</b>
1.1. Понятие взрыва.....	12
1.1.1. Определения взрыва .....	12
1.1.2. Классификация разновидностей взрыва.....	17
1.2. Основы теории теплового взрыва .....	30
1.2.1. Основные положения теории теплового взрыва .....	31
1.2.2. Элементы математической модели теплового взрыва.....	38
1.2.3. Диаграмма Семёнова .....	40
1.2.4. Влияние технологических параметров на условия возникновения теплового взрыва.....	44
1.2.5. Границы применимости теории теплового взрыва.....	48
1.3. Основы теории цепного взрыва .....	49
1.3.1. Основные положения теории цепного взрыва.....	49
1.3.2. Элементы математической модели цепного взрыва.....	56
1.3.3. Диаграмма трех пределов.....	57
1.3.4. Влияние технологических параметров на условия возникновения цепного взрыва .....	62
1.4. Основы теории детонации.....	67
1.4.1. Основные положения теории детонации.....	67
1.4.2. Элементы математической модели детонации.....	68
1.4.3. Диаграмма адиабаты Гюгонио .....	69
<b>Глава 2. Взрывоопасность объектов ядерного топливного цикла .....</b>	<b>78</b>
2.1. Объекты ядерного топливного цикла.....	78
2.1.1. Понятие объекта ядерного топливного цикла.....	78

---

2.1.2. Понятие систем объекта ядерного топливного цикла.....	79
2.1.3. Понятие элементов систем ядерного топливного цикла.....	82
<b>2.2. Характеристика взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла</b> .....	<b>84</b>
2.2.1. Понятие взрывоопасности ядерного топливного цикла.....	84
2.2.2. Понятие потенциальной взрывоопасности.....	90
2.2.3. Понятие взрывоопасности технологической среды.....	94
<b>2.3. Показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов,</b> <b>применяемых на объекте ядерного топливного цикла.....</b>	<b>102</b>
2.3.1. Перечень показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов.....	102
2.3.2. Значения показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов, применяемых и образуемых на объекте ядерного топливного цикла.....	109
2.3.3. Характеристики способности взрываться веществ и материалов, применяемых и образуемых на объектах ядерного топливного цикла.....	116
2.3.4. Функциональные зависимости между показателями пожаровзрывоопасности веществ и материалов.....	131
2.3.5. Категории взрывоопасности.....	140
<b>2.4. Аварийные взрывы на объекте ядерного топливного цикла.....</b>	<b>146</b>
2.4.1. Понятие аварийного взрыва на объекте ядерного топливного цикла .....	146
2.4.2. Понятие неуправляемой химической экзотермической реакции.....	155
2.4.3. Специфика аварийных взрывов на объекте ядерного топливного цикла .....	160
2.4.4. Сведения об аварийных взрывах на объекте ядерного топливного цикла.....	163

**Часть 2. Система нормативного обеспечения  
взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла..... 170**

**Глава 1. Понятие взрывобезопасности объектов ядерного  
топливного цикла..... 170**

1.1. Составная часть ядерной и радиационной безопасности..... 170

1.2. Принадлежность к пожарной и промышленной безопасности..... 172

1.3. Содержание понятия взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла ..... 174

**Глава 2. Нормативная база предотвращения взрывопожароопасности объектов ядерного топливного цикла**  
..... 179

2.1. Основы нормативно-правового регулирования безопасности при использовании атомной энергии..... 179

2.2. Структура нормативной базы обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла ..... 181

**Глава 3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии, содержащие требования по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла**..... 188

3.1. Систематизация федеральных норм и правил в области использования ядерной энергии ..... 188

3.2. Категорирование требований ..... 191

3.3. Взаимосвязь общих и специальных требований..... 194

3.4. Комментарии к общим требованиям по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла..... 198

3.5. Специфика требований к физическим барьерам объектов ядерного топливного цикла ..... 206

3.6. Основные положения по обеспечению водородной взрывобезопасности ..... 209

**Глава 4. Общие требования пожарной безопасности по предотвращению пожаров и взрывов** ..... 216

4.1. Понятие горючей среды..... 216

4.2. Способы исключения условий образования горючей среды..... 219

4.3. Способы исключения условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания .....	223
4.4. Понятие взрывоопасной и пожаровзрывоопасной сред .....	227
<b>Глава 5. Требования промышленной безопасности к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов</b> .....	<b>231</b>
5.1. Целеполагающие требования к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов.....	231
5.2. Система требований по исключению возможности взрыва .....	239
5.3. Система требований по предотвращению возникновения взрыва .....	253
5.4. Требования по ликвидации последствий взрыва .....	257
<b>Глава 6. Критические значения параметров взрывоопасных технологических процессов</b> .....	<b>261</b>
6.1. Понятие критических значений параметров.....	261
6.2. Уровни критических значений параметров .....	265
6.3. Концентрационные пределы .....	281
6.4. Температурные пределы .....	292
6.5. Пределы по геометрическим размерам .....	303
6.6. Энергетические пределы .....	309
6.7. Совокупность критических значений параметров.....	321
<b>Глава 7. Рекомендации по обеспечению взрывопожаробезопасности объектов ядерного топливного цикла</b> .....	<b>328</b>
7.1. Рекомендации по оценке взрывопожаробезопасности технологических процессов радиохимических производств.....	328

7.1.1. Структура рекомендаций.....	328
7.1.2. Область применения рекомендаций .....	329
7.1.3. Рекомендации по отнесению технологических процессов радиохимических производств к пожаровзрывоопасным .....	329
7.1.4. Рекомендации по использованию показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов .....	331
7.1.5. Рекомендации по разработке технических и организационных мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств .....	332
7.1.6. Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств.....	333
7.1.7. Рекомендации по составу и содержанию документации, обосновывающей пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств.....	334
<b>7.2. Рекомендации по оценке пожаровзрывоопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива .....</b>	<b>336</b>
7.2.1. Структура рекомендаций.....	336
7.2.2. Область применения рекомендаций .....	337
7.2.3. Общие рекомендации .....	338
7.2.4. Рекомендации по этапам оценки взрывопожароопасности сорбционных систем .....	339
<b>7.3. Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности процессов с применением пирофорных материалов на объектах ядерного топливного цикла .....</b>	<b>342</b>
7.3.1. Структура рекомендаций.....	342
7.3.2. Назначение и область применения .....	343
7.3.3. Рекомендации по контролю за фракционным составом и удельной поверхностью пирофорных материалов.....	345
7.3.4. Рекомендации по обеспечению безопасных условий при обращении с пирофорными материалами .....	346
7.3.5. Рекомендации, относящиеся к обоснованию безопасных условий при обращении с пирофорными материалами.....	349
<b>7.4. Практические рекомендации по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла.....</b>	<b>351</b>
<b>Список литературы .....</b>	<b>354</b>

## Список сокращений

АС	–	атомная станция
ВВ	–	взрывчатое вещество
ВКП	–	верхний концентрационный предел
ВКПВ	–	верхний концентрационный предел воспламенения
ГО	–	герметичное ограждение
ЖРО	–	жидкие радиоактивные отходы
ИИ	–	ионизирующее излучение
НКП	–	нижний концентрационный предел
НКПВ	–	нижний концентрационный предел воспламенения
НУ	–	мононитрид урана
ОИАЭ	–	объект использования атомной энергии
ООБ	–	отчет по обоснованию безопасности
ОЯТЦ	–	объект ядерного топливного цикла
ПАЗ	–	противоаварийная защита
ПБЭ	–	пределы безопасной эксплуатации
ПВБ	–	пожаровзрывобезопасность
ПХ	–	пункты хранения
РАО	–	радиоактивные отходы
РБ	–	руководство по безопасности при использовании атомной энергии



*Список сокращений*

---

РВ	–	радиоактивные вещества
РУ	–	реакторная установка
РФ	–	Российская Федерация
РХП	–	радиохимическое производство
СНУП	–	Смешанное нитридное уран-плутониевое топливо
ТБФ	–	трибутилфосфат
ФЗ	–	федеральный закон
ФНП	–	федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии
ЯМ	–	ядерные материалы
ЯРБ	–	ядерная и радиационная безопасность
ЯТЦ	–	ядерный топливный цикл
ЯУ	–	ядерная установка

## Введение

Опыт эксплуатации объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), в том числе ОЯТЦ, показывает, что повышенную радиационную опасность для населения и окружающей среды могут представлять аварийные взрывы.

Проблема предотвращения аварийных взрывов на ОЯТЦ является комплексной. Для ее решения используют систему мер, относящихся к обеспечению ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ), промышленной и пожарной безопасности. При этом применение общих требований по обеспечению взрывобезопасности для предотвращения аварийных взрывов на ОЯТЦ связано с необходимостью учета специфики технологических сред ОЯТЦ, а установление специальных требований и рекомендаций по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ – с необходимостью их использования в комплексе с существующими требованиями по обеспечению промышленной и пожарной безопасности.

Поскольку опасность возникновения аварийных взрывов сохраняет свою актуальность и в настоящее время, возникает потребность в систематизации сведений, относящихся к специфике обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ. Это относится как к обобщению сведений по условиям возникновения взрывов в радиационно-химических средах, так и к совершенствованию действующих норм и правил в области предотвращения взрывоопасности на ОЯТЦ.

Проблема предотвращения взрывоопасности ОЯТЦ включает две составляющие: анализ (оценка) взрывоопасности и обеспечение их взрывобезопасности (предотвращение их взрывоопасности). В связи с этим сведения о современном состоянии обеспечения взрывоопасности ОЯТЦ изложены авторами в двух частях: часть 1 «Специфика взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла» и часть 2 «Система нормативного обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла».

В первой части книги рассмотрены физико-химические свойства взрывчатых превращений, особенно ОЯТЦ и их взрывоопасности.

Во второй части книги рассмотрена специфика понятия взрывобезопасности ОЯТЦ, основы нормативной базы по обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ, систематизированы специальные и общие требования по обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ, приведены физико-химические сведения, используемые для обоснования взрывобезопасных условий осуществления технологических процессов ОЯТЦ.

В основу обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ положено обязательное выполнение требований, установленных в нормативных документах, по исключению и предотвращению взрывов.

Система требований по обеспечению взрывобезопасности технологических процессов, осуществляемых на ОЯТЦ, включает две составляющие.

Во-первых, при проектировании, эксплуатации и выводе из эксплуатации ОЯТЦ должны выполняться общие требования по обеспечению пожаровзрывобезопасности (ПВБ) технологических процессов.

Во-вторых, дополнительно должны выполняться специальные требования к обеспечению ПВБ ОЯТЦ, установленные с учетом специфики радиохимического производства (РХП), что обусловлено следующими обстоятельствами:

- технологические среды ОЯТЦ содержат широкий спектр радионуклидов, некоторые из которых способны инициировать неуправляемые химические экзотермические реакции, протекающие в режиме теплового взрыва;

- технологические среды ОЯТЦ обладают дополнительным источником энергии, выделяющейся при радиоактивных распадах, который может выполнять функции источника зажигания.

Установленные требования по обеспечению взрывобезопасности базируются на знании физико-химических условий перехода экзотермических реакций в режимы горения и взрыва.

В связи с этим большое значение для обоснования взрывобезопасности ОЯТЦ приобретает корректное применение показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов, образующих технологические среды ОЯТЦ, с учетом их совместного влияния на изменение границ областей самовоспламенения и взрыва.

Данная книга посвящена систематическому рассмотрению основ нормативного обеспечения и физико-химического обоснования взрывобезопасности ОЯТЦ. Она предназначена для инспекторского состава Ростехнадзора и специалистов ядерно-энергетического комплекса России, занимающихся вопросами повышения взрывобезопасности ОЯТЦ, а также может быть полезна для молодых сотрудников (аспирантов, студентов), деятельность которых связана с анализом безопасности ОЯТЦ, и представляет собой введение в проблему предотвращения взрывоопасности ОЯТЦ.

**Часть 1.**  
**Специфика взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла**

**Глава 1.**  
**Физико-химические основы взрывчатых превращений**

**1.1. Понятие взрыва**

**1.1.1. Определения взрыва**

Введение в обеспечение взрывобезопасности ОЯТЦ, очевидно, должно исходить из понятия взрыва, представляющего опасность для этих объектов.

В нормативных правовых документах, относящихся к обеспечению безопасности промышленных объектов, приведены следующие определения взрыва:

*«Быстрое химическое превращение среды, сопровождающееся выделением энергии и образованием сжатых газов» [1].*

*«Неконтролируемый быстропротекающий процесс выделения энергии, связанный с физическим, химическим или физико-химическим изменением состояния вещества, приводящий к резкому динамическому повышению давления или возникновению ударной волны, сопровождающийся образованием сжатых газов, способных привести к разрушительным последствиям» [2].*

*«Быстрое экзотермическое химическое превращение взрывоопасной среды, сопровождающееся выделением энергии и образованием сжатых газов, способных производить работу» [3].*

*«Процесс выделения энергии за короткий промежуток времени, связанный с мгновенным физико-химическим изменением состояния вещества, приводящим к возникновению скачка давления или ударной волны, сопровождающийся образованием сжатых газов или паров, способных производить работу» [4].*

*«Скоротечная реакция окисления или разложения, в результате которой наблюдается увеличение температуры или давления, или обоих параметров одновременно» [5].*

Знакомство с этими определениями позволяет выделить общие указанные в них признаки взрыва: быстрое превращение с выделением сжатых газов. Можно также отметить существующие отличия, которые заключаются в следующем.

Согласно установленным определениям термина «взрыв» для обеспечения ПVB [1] и водородной взрывозащиты [3] достаточно принимать во внимание только химическое превращение среды

(в результате таких взрывов образуются новые химические продукты), в то время как собственно для предотвращения взрывоопасности необходимо учитывать изменение физического, химического или физико-химического состояния вещества [2, 4]. Например, взрыв баллона со сжатым инертным газом связан с изменением лишь физического состояния вещества и поэтому не подходит под определение [1], но подходит под определение [2].

Что касается определения [5], то в нем присутствуют две неточности: 1) в отличие от процесса, реакция окисления не существует сама по себе – для пары реагентов в окислительно-восстановительной реакции один реагент окисляется, а другой восстанавливается; 2) при взрыве допущена возможность увеличения температуры без изменения давления.

Разнообразные варианты определения взрыва, характеризующие широкий спектр его признаков, приведены также в научной, справочной и учебной литературе. Из их числа можно выделить следующие характерные формулировки взрыва, приведенные в авторитетных источниках [6–10], которые представлены в табл. № 1.

В рассмотренных примерах отмечены такие специфичные признаки взрыва как: возникновение в ограниченном объеме, сопровождение грохотом, неуправляемость, внезапность, необратимость и другие.

Вместе с тем существующая иерархия (соподчиненность) нормативных документов диктует необходимость однозначного толкования терминов. Вследствие этого можно отметить, что в настоящий момент существует потребность в поиске единообразной формулировки определения термина «взрыв» на основе обобщения различных выявленных признаков или аспектов этого понятия.

Таблица № 1

**Разновидности определения взрыва**

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
1	<i>«Взрыв (В.), процесс освобождения большого количества энергии в ограниченном объеме за короткий промежуток времени. В результате В. вещества, заполняющие объем, в котором происходит освобождение энергии, превращаются в сильно нагретый газ с очень высоким давлением. Этот газ с большой силой воздействует на окружающую среду,</i>	[6]

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
	<p><i>вызывая ее движение. В. в твердом теле сопровождается его разрушением и дроблением.</i></p> <p><i>Если создаются условия, при которых выделяющаяся теплота не успевает отводиться за пределы взрывчатого вещества, то благодаря повышению температуры развивается самоускоряющийся процесс химического разложения, который называется тепловым В.».</i></p>	
2	<p><i>«Толковый словарь дает следующее определение взрыва: явление, сопровождающееся: резким грохотом, быстрой химической реакцией с выделением тепла и стремительным расширением газа, а также разрушающим действием за счет повышенного давления в области взрыва. Более строгое научное определение взрыва ...: «Под взрывом в атмосфере подразумевается выделение энергии за такой промежуток времени и в таком объеме, которые достаточно малы для возникновения волны давления конечной амплитуды, распространяющейся от источника взрыва. Энергия источника может быть ядерной, химической или электрической либо энергией давления. Однако выделение этой энергии не является взрывом, если оно недостаточно локализовано во времени и пространстве и не приводит к образованию воспринимаемой на слух волны давления. Хотя обычно взрывам сопутствуют разрушения, вовсе не обязательно, чтобы они имели место. Однако для взрыва необходимо, чтобы он сопровождался звуковым эффектом.</i></p> <p><i>Протекание гомогенной экзотермической химической реакции в любой изолированной химической системе должно привести к взрыву. В таких изолированных системах могут происходить взрывы двух типов – чисто тепловой взрыв и цепной взрыв»</i></p>	[7]
3	<p><i>«Взрыв – это быстрое неуправляемое физическое или химическое превращение вещества, сопровождающееся образованием большого количества сжатых газов, под давлением которых происходит разрушение объектов. При взрыве потенциальная энергия системы переходит в механическую работу. Его горючие газообразные продукты, соприкасаясь с воздухом, часто</i></p>	[8]

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
	<i>воспламеняются, что может привести к пожару, усугубляющему негативные последствия»</i>	
4	<i>«Взрыв – это внезапное высвобождение энергии, сопровождающееся образованием волны сжатия и громким шумом. Взрыв несет потенциальную опасность поражения людей и обладает разрушающей способностью»</i>	[9]
5	<i>«Взрывом называют быстрое, термодинамически необратимое изменение состояния вещества, сопровождающееся нарушением механического равновесия с внешней средой, быстрым расширением (разлетом) вещества или резким повышением давления (возбуждением ударных или упругих волн в окружающей среде. В наиболее типичных случаях взрыв связан со значительным разогревом вещества в очаге взрыва и превращением его в газ или плазму высокого давления, которые, расширяясь, совершают механическую работу. Характерные примеры: взрывной распад метастабильного химического вещества, ядерный взрыв, электрический взрыв проводника, взрыв на поверхности или внутри сплошной среды при фокусировке излучения импульсного лазера, взрыв при высокоскоростном ударе метеорита о поверхность планеты, взрыв пароводяного котла или баллона со сжатым газом. В предпоследнем примере разогрев и взрыв разделены во времени, а в последнем – разогрев может отсутствовать вообще. К взрывным часто относят также безгазовые процессы хрупкого разрушения области с высокой концентрацией упругой энергии в твердом теле (например, в земной коре очаг землетрясения); однако в большинстве случаев «рабочим телом» взрыва является горячий газ, образующийся в момент взрыва»</i>	[10]

В контексте понятия взрыва следует отметить, что взрыв может возникать только при наличии определенных условий. Например, представляющая значительную взрывоопасность в атомной отрасли смесь водорода с кислородом (так называемая «гремучая смесь») может при комнатной температуре продолжительное время находиться в герметичном сосуде без протекания реакции.

В [11] сформулированы три условия, необходимые для возникновения в реакционной системе взрыва.

*«Необходимым (но в отдельности еще недостаточным) условием для возникновения взрыва является образование при реакции разложения значительного количества газов.*

*Железоалюминиевый термит почти не образует газовой фазы при горении и поэтому не обладает взрывчатыми свойствами. Искрение и разбрасывание отдельных частиц при горении термита осуществляются за счет находящегося в нем воздуха, который расширяется при повышении температуры.*

*Вторым непременным (но в отдельности тоже недостаточным) условием для возникновения взрыва является высокая экзотермичность реакции. Весьма вероятно, что взрыв может возникнуть в том случае, если температура в зоне реакции будет не менее 500–600 °С.*

*Третьим условием, определяющим способность системы к возникновению и развитию в ней процессов взрывчатого разложения, является гомогенность системы».*

Сходные требования к условиям, необходимым для возникновения взрыва, приведены в [12]. *«Для того, чтобы протекать в форме взрыва, химическая реакция должна удовлетворять четырем основным условиям:*

- 1) экзотермичность;*
- 2) образование газов;*
- 3) большая скорость;*
- 4) способность к самораспространению.*

*Эти условия не являются абсолютными и независимыми друг от друга. Так, большая скорость реакции определяется не только величиной константы скорости, но и температурой, достигаемой при реакции. Точно также способность реакции к самораспространению в значительной мере зависит от скорости ее протекания и теплового эффекта. Отсутствие или наличие газов в продуктах реакции также в известной степени обусловлено тепловым эффектом.*

*Четыре условия в своем сочетании определяют не только возможность самораспространения химической реакции в форме взрыва, но и механическое действие последнего».*

В [13] сообщается, что *«для взрыва характерны три обязательных условия (фактора):*

- 1) экзотермичность реакции;*



2) высокая скорость протекания реакции (время реакции составляет  $10^{-4} - 10^{-7}$  с);

3) большое давление газообразных продуктов, которые в процессе расширения совершают механическую работу».

Для того, чтобы оценить, насколько необходимы и достаточны перечисленные условия, следует ознакомиться с существующими теориями возникновения взрыва.

### ***1.1.2. Классификация разновидностей взрыва***

Взрывы способны возникать при различных обстоятельствах. Из-за многообразия существующих разновидностей взрыва возникает потребность в их систематизации.

На основании анализа сведений, приведенных в нормативных документах и научных публикациях, можно выделить следующие классификационные признаки разновидностей взрыва.

1. Взрывы различают по месту происхождения: природные и на производстве. Последние подразделяются на контролируемые (преднамеренные или направленные) и аварийные (случайные).

Источниками природных взрывов на Земле являются молнии, вулканы, метеориты, землетрясения, а в космосе – образование новых звезд.

Контролируемые взрывы используют для решения практических задач. Они различаются по мощности и местоположению заряда, например, наземный, подземный, подводный и другие.

С точки зрения предотвращения взрывоопасности на производстве основную опасность представляет аварийный взрыв. Общее определение аварийного взрыва (без учета специфики ОЯТЦ) дано в [4]: «аварийный взрыв: взрыв, произошедший в результате нарушения технологии производства, ошибок обслуживающего персонала либо ошибок, допущенных при проектировании».

2. Взрывы различают по режиму протекания взрывного процесса: дефлаграционные и детонационные.

Уже на начальном этапе изучения взрывчатых превращений было установлено наличие у них отличительных признаков.

Согласно [14], «термины «горение» (или «дефлаграция») и «детонация» соответствуют двум совершенно различным, но вполне определенным видам разложения взрывчатых веществ. Термин «взрыв» значительно менее точен. Мы будем употреблять его, как это принято,

для обозначения совокупности горения и детонации, а также в сомнительных случаях, когда нельзя установить, имеет ли место настоящая детонация или нет. Часто горение переходит в детонацию. Обратное явление наблюдается значительно реже».

Определения, характеризующие отличительные признаки понятий терминов «дефлаграция» и «детонация», представлены в табл. № 2 и 3.

В [15] приведены следующие характеристики различных режимов взрывчатых превращений:

1) Нормальное послойное горение (НГ), распространяющееся с постоянной скоростью с неизменным профилем температуры и концентрации, характеризующееся фронтальной скоростью  $u = 10^{-3} - 10^1$  м/с, давлением  $P = 10^5 - 10^9$  Па, мощностью  $N = 10^3 - 10^5$  кВт/м<sup>2</sup>;

2) Конвективное горение (КГ), распространяющееся струями сгоревшего вещества при достижении давления срыва нормального горения с характеристиками:  $u = 10^{-3} - 10^1$  м/с,  $P = 10^5 - 10^8$  Па,  $N = 10^5 - 10^8$  кВт/м<sup>2</sup>;

3) Низкоскоростная детонация (НСД) – волновой процесс с малой долей разложения непосредственно за фронтом волны сжатия с характеристиками:

$$u = 10^{-1} - 10^2 \text{ м/с, } P = 10^8 - 10^9 \text{ Па,}$$

$$N = (1 - 3)10^9 \text{ кВт/м}^2.$$

4) Нормальная детонация (НД) – сверхзвуковой стационарный комплекс, состоящий из ударной волны и химической реакции за ней с характеристиками:  $u = (2 - 9)10^3$  м/с,  $P = (1 - 30)10^9$  Па,  $N = 10^9 - 10^{11}$  кВт/м<sup>2</sup>.

В [15] отмечено, что указанная последовательность (НГ-КГ-НСД-НД) обладает рядом особенностей:

– при определенных условиях один режим может переходить в другой в поступательном направлении от процесса с низкоскоростными параметрами к высокопараметрическому;

– возможно возбуждение любого из перечисленных режимов, который может переходить в последующий;

– обратный переход НД-НСД-КГ-НГ исключается;

– чем выше порядок процесса, тем выше параметры процесса взрывчатого превращения (давление, скорость) и тем короче время его протекания.

Таким образом, предотвращение взрывоопасности включает в себя предотвращение всех возможных режимов протекания взрывчатых превращений.

Соответственно, наибольшую опасность для производственных объектов по своим разрушительным последствиям представляют аварийные детонационные взрывы.

Таблица № 2

### Определения дефлаграционного взрыва

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
1	<i>«Дефлаграционный взрыв: взрыв, при котором нагрев и воспламенение последующих слоев взрывчатого вещества происходит в результате диффузии и теплопередачи, характеризующийся тем, что фронт волны сжатия и фронт пламени движутся с дозвуковой скоростью»</i>	[4]
2	<i>«Дефлаграционный взрыв облаков газопаровоздушных смесей – энерговыделение в объеме облака при распространении экзотермической химической реакции с дозвуковой скоростью (взрывное горение)»</i>	[16]
3	<i>«Дефлаграция – взрыв водородсодержащей смеси в ограниченном объеме, фронт реакции которого распространяется с дозвуковой скоростью и при котором создаются умеренное давление и тепловые нагрузки (взрывное горение)»</i>	[3]
4	<i>«Дефлаграция – процесс распространения взрывного превращения за счет конвективного горения. При этом нагретые продукты сгорания проникают в несгоревшее вещество, обеспечивая высокую скорость фронта горения. Величина давления газообразных продуктов реакции, необходимого для такого режима, определяется прочностью и структурой состава – чем ниже пористость и больше прочность, тем труднее создать условия для дефлаграции. После возникновения таких условий реакция идет с разгоном и для некоторых составов может перейти в детонацию. Максимальное давление обычно определяется прочностью оболочки, и в отличие от детонации, дефлаграция не способна передаваться через слой вещества, разделенный тонкой прочной перегородкой. Время реакции ограничено оттоком газов из оболочки и может быть значительно выше, чем при</i>	[17]

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
	<i>детонации. В некоторых случаях дефлаграция после стадии разгона выходит на высокую, но постоянную скорость, при этом трудно провести границу между дефлаграцией и быстрым горением. Иногда процесс является одновременно и дефлаграцией, и послыйным горением»</i>	
5	<i>«Дефлаграция – режим сгорания парового облака (а также других взрывчатых веществ и смесей). В соответствии с классическим определением распространение пламени в этом режиме происходит посредством процессов диффузии и теплопроводности, а скорость горения меньше скорости звука. Расширение продуктов горения при дефлаграции может приводить к возникновению движения среды, волны сжатия и, в ряде случаев, ударной волны. При этом, хотя скорость распространения горения по частицам определяется процессами теплопроводности диффузии (вообще говоря, турбулентными), видимая скорость распространения горения может приближаться к скорости звука и даже превосходить ее. В современной литературе под дефлаграцией понимается весь спектр процессов горения – от распространения ламинарного пламени до высокоскоростных процессов с ударными волнами, в которых отсутствует жесткая связь между ударным фронтом и фронтом химического превращения, которая имеет место при детонации. Основным поражающим фактором при высокоскоростной дефлаграции является ударная волна»</i>	[9]

Таблица № 3

### Определения детонационного взрыва

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
1	<i>«Детонационный взрыв: взрыв, при котором воспламенение последующих слоев взрывчатого вещества происходит в результате сжатия и нагрева ударной волной, характеризующийся тем, что ударная волна и зона химической реакции следуют неразрывно друг за другом с постоянной сверхзвуковой скоростью»</i>	[4]

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
2	<i>«Детонация: распространение взрыва по взрывчатому веществу, обусловленное прохождением ударной волны с постоянной сверхзвуковой скоростью, обеспечивающей быструю химическую реакцию»</i>	[4]
3	<i>«Детонация – взрыв водородсодержащей смеси в ограниченном объеме, фронт реакции которого распространяется со сверхзвуковой скоростью и при котором создаются высокое давление и высокий скоростной напор»</i>	[3]
4	<i>«Детонация – режим сгорания парового облака (а также других взрывчатых веществ и смесей). В детонационном режиме возникает мощная самоподдерживающаяся ударная волна, сжимающая вещество и инициирующая химическое превращение с выделением энергии. Скорость детонационной волны больше скорости звука в исходной смеси. Детонация характеризуется жесткой связью между ведущей процесс ударной волной и следующим за ней фронтом химического превращения. При детонационном превращении парового облака основным поражающим фактором является воздушная ударная волна»</i>	[9]
5	<i>«Детонация (полная) – процесс распространения взрывчатого превращения, обусловленный прохождением ударной волны во взрывчатом веществе и протекающий для данного вещества при данных условиях с постоянной скоростью, измеряемой тысячами метров в секунду. В случае снижения качества взрыва вещества (увлажнение, слеживание и т. п.), недостаточного начального импульса и по другим причинам процесс детонации может протекать с меньшими и непостоянными скоростями (неполная детонация) и в конце концов может перейти в горение или вовсе затухнуть»</i>	[13]
6	<i>«Детонация – штатный режим взрывного превращения бризантных взрывчатых веществ, протекающий со скоростями выше скорости звука в данном веществе. В установившемся режиме детонации вещество инициируется взрывной волной, а высокая скорость реакции с выделением газов и энергии эту волну подпитывает. Скорость ударной волны выше скорости звука, что обеспечивает независимость параметров</i>	[17]

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
	<p><i>детонации от окружающей среды (возмущения попросту не успевают ее «догнать»). Для поддержания детонации требуется высокий уровень давления. Поскольку за фронтом детонационной волны давление быстро спадает, для ее поддержания требуется чрезвычайно высокая скорость реакции, а это, в свою очередь, выдвигает требование к температуре – ниже 1 500–2 000 °С время реакции становится слишком велико. В то же время высокое давление подавляет процессы испарения и диссоциации продуктов взрыва, поэтому развиваемая при детонации температура заметно выше, чем при горении и дефлаграции тех же составов. Реакция может идти в несколько стадий, в этом случае параметры детонации определяются самой быстрой, а более медленные слабо на нее влияют. Такой режим называют «неидеальной» детонацией, а когда быстро реагирует только один из компонентов – «селективной». При высокой доле медленных реакций детонация приобретает черты дефлаграции»</i></p>	
7	<p><i>«Детонация является особым типом экзотермической реакции, которая всегда вводится ударной волной. При детонации химическая реакция начинается в результате нагрева, который создается при ударном сжатии вещества, а затем протекает так быстро, что вся энергия, заключенная в взрывчатом веществе (ВВ), освобождается до того, как наступает какое-либо заметное расширение вещества. Выделяющейся энергии достаточно, чтобы воспрепятствовать затуханию фронта ударной волны. Отсюда следует, что при детонации в отличие от горения плотность продуктов реакции вначале выше плотности ВВ. Направление потока продуктов реакции совпадает с направлением фронта реакции. Передача энергии от прореагировавшего вещества к не прореагировавшему осуществляется волнами сжатия, а не теплопередачей, как при горении»</i></p>	[18]

3. Взрывы различают по источнику высвобождения энергии (по типу взрывоопасной системы): физические и химические.

Согласно [4] «*взрывоопасная система: термодинамическая система, состоящая из взрывчатых веществ, взрывоопасных горючих*

смесей, взрывчатых смесей пыли, а также сосуды, работающие под давлением, обладающие способностью выделять энергию в виде взрыва».

К физическим взрывам относят: ядерный и термоядерный взрывы, взрывы сосудов под высоким давлением, взрывы при контакте жидкостей со значительным отличием температуры.

Например, «ядерный взрыв – взрыв, вызванный выделением внутриядерной энергии» [19].

Определения разновидностей физических взрывов, представляющих опасность для ОЯТЦ, приведены в табл. № 4.

«Химический взрыв: взрыв, вызываемый быстрым химическим превращением веществ, при котором потенциальная химическая энергия переходит в тепловую и кинетическую энергию расширяющихся продуктов взрыва» [4].

Наибольшую взрывоопасность для ОЯТЦ представляют химические взрывы технологических сред, содержащих радиоактивные вещества (РВ).

Таблица № 4

#### Определения физического взрыва

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
1	«Физический взрыв: взрыв, вызываемый изменением физического состояния вещества»	[4]
2	«Взрыв физический – взрыв, обусловленный разрушением емкостей, содержащих газы под высоким давлением»	[20]
3	«Взрыв сосуда под высоким давлением: взрыв сосуда, в котором в рабочем состоянии хранятся сжатые под высоким давлением газы или жидкости, либо взрыв, в котором давление возрастает в результате внешнего нагрева или в результате самовоспламенения образовавшейся смеси внутри сосуда»	[4]
4	«Сосуд под высоким давлением: закрытая емкость, которая предназначена для хранения, транспортирования и использования жидкости или газа под давлением большим, чем атмосферное, проектируемая согласно специальным требованиям.»	[4]

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
	<i>Разновидностями сосудов под высоким давлением являются баллоны, резервуары, цистерны и трубопроводы»</i>	
5	<i>«Взрыв резервуара с перегретой жидкостью при воздействии на него очага пожара – процесс разрушения резервуара при нагреве от очага пожара находящейся в резервуаре жидкости до температуры, превышающей нормальную температуру кипения с дальнейшим взрывообразным вскипанием жидкости. Процесс сопровождается образованием волн давления, и, если жидкость горючая, «огненным шаром»</i>	[21]
6	<i>«Огненный шар – крупномасштабное диффузионное горение, реализуемое при разрыве резервуара с горючей жидкостью или газом под давлением с воспламенением содержимого резервуара»</i>	[21]
7	<i>«Физическая детонация: процесс, возникающий при смешении жидкостей с разными температурами, когда температура одной из них значительно превышает температуру кипения другой»</i>	[4]
8	<i>«Физическая детонация возникает при смешении горячей и холодной жидкостей, когда температура одной из них значительно превышает температуру кипения другой (например, при выливании расплавленного металла в воду). В образовавшейся парожидкостной смеси испарение может протекать взрывным образом вследствие развивающихся процессов тонкой фрагментации капель расплава, быстрого теплоотвода от них и перегрева холодной жидкости. Физическая детонация сопровождается возникновением ударной волны с избыточным давлением в жидкой фазе, достигающим в некоторых случаях тысяч атмосфер»</i>	[9]

4. Химические взрывы различают по фазовому составу или плотности взрываемых систем: сосредоточенные взрывы или взрывы конденсированных взрывчатых веществ (твердых взрывчатых веществ,



жидких взрывчатых систем) и объемные взрывы в воздушной среде (газовоздушных, газопаровоздушных, пылевоздушных, пылегазовых, пылевых).

На ОЯТЦ сосредоточенные взрывы способны возникать внутри оборудования с конденсированной технологической средой.

*«Сосредоточенный взрыв: взрыв конденсированного взрывчатого вещества или конденсированной взрывоопасной системы»* [4].

*«Взрывчатое вещество: химическое соединение или смесь веществ, способные в определенных условиях к крайне быстрому самораспространяющемуся химическому превращению с выделением тепла и образованием большого количества газообразных продуктов»* [4].

Объемные взрывы могут возникать на ОЯТЦ при взрыве газообразных сред внутри оборудования, вентиляционной системы, производственного помещения.

Определения объемного взрыва и его разновидностей приведены в табл. № 5.

Таблица № 5

**Определения разновидностей объемного взрыва**

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
1	<i>«Объемный взрыв: детонационный или дефлаграционный взрыв газовоздушных, пылевоздушных и пылегазовых облаков»</i>	[4]
2	<i>«Облако: дисперсия в атмосфере какого-либо вещества в любом из возможных фазовых состояний»</i>	[4]
3	<i>«Взрыв в воздушной среде – локализованный в пространстве процесс быстрого перехода потенциальной энергии в кинетическую энергию окружающей среды в форме волны давления, колебаний грунта, летящих предметов и теплового излучения области энерговыделения»</i>	[16]

Часть I. Специфика взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла  
Глава I. Физико-химические основы взрывчатых превращений

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
4	«Взрыв пылевоздушной (пылегазовой) смеси: взрыв, когда первоначальный инициирующий импульс способствует возмущению пыли (газа), что приводит к последующему мощному взрыву»	[4]
5	«Пылевое облако – облако пыли, то есть взвесь частиц в воздухе»	[9]
6	«Взрыв парового облака характеризуется возникновением ударной волны, имеющей место при двух режимах сгорания парового облака – детонации и дефлаграции»	[9]
7	«Паровое облако – облако паров, то есть смесь капель вещества, его паров и воздуха»	[9]
8	«Подушка паровая – паровое облако, ограниченное поверхностью жидкости, боковыми стенками резервуара и его крышей. Образуется в результате естественного испарения хранимой в резервуаре жидкости»	[9]
9	«Взрыв паровоздушного облака – процесс сгорания горючей паровоздушной смеси в открытом пространстве с образованием волн давления»	[21]
10	«Взрыв паровоздушной смеси в ограниченном объеме (резервуаре или производственном помещении) – процесс сгорания образовавшейся в ограниченном объеме горючей паровоздушной смеси с повышением давления в этом объеме»	[21]

5. Химические взрывы различают также по типу протекающих химических реакций, представленных в табл. № 6.

Таблица № 6

**Разновидности химических реакций, приводящих к взрыву**

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
1	<i>«Самый простой случай взрыва – это процесс разложения, который дает газообразные продукты. Один из примеров – пероксид водорода, который разлагается со значительной теплотой реакции, давая водяной пар и кислород»</i>	[9]
2	<i>«Окислительно-восстановительные реакции, в которых воздух или кислород реагирует с восстановителем, весьма обычны и составляют основу всех реакций горения. В тех случаях, когда восстановитель является недиспергированным твердым веществом или жидкостью, реакции горения протекают недостаточно быстро, чтобы стать взрывными. Если, однако, твердое вещество мелко раздроблено или жидкость находится в виде капелек, то возможен быстрый рост давления. Это, вообще говоря, может привести в условиях замкнутого объема к росту избыточного давления вплоть до 8 бар»</i>	[9]
3	<i>«Некоторые вещества могут полимеризоваться, более или менее самопроизвольно, и обычные реакции полимеризации будут экзотермическими. Если мономер – летучий, как это часто бывает, достигается стадия, при которой может произойти опасное повышение давления. Иногда полимеризация может протекать только при повышенных температурах, но для некоторых веществ, таких как этиленоксид, полимеризация может начаться при комнатной температуре, особенно когда исходные соединения загрязняются веществами, ускоряющими полимеризацию. Этиленоксид может также изомеризоваться в ацетальдегид экзотермическим путем»</i>	[9]
4	<i>«Реакции конденсации весьма распространены. Они особенно широко применяются в производстве красок, лаков и смол, где служат основой процессов в реакторах непрерывного действия со змеевиком для нагрева или</i>	[9]

№ п/п	Определение	Ссылка на источник
	<i>охлаждения. Зарегистрировано много примеров неконтролируемых реакций, обусловленных тем, что скорость переноса тепла в таких сосудах является линейной функцией разности температур между реакционной массой и охладителем, тогда как скорость реакции – это экспоненциальная функция температуры реагента»</i>	
5	<i>«Неконтролируемая реакция – химическая реакция, протекающая либо в условиях промышленного предприятия и не предусмотренная технологией, либо протекающая в технологической установке в режимах, не позволяющих управлять параметрами процесса»</i>	[9]

6. Химические взрывы различают и по механизму их возникновения: тепловые, цепные, комбинированные.

Наиболее распространенным химическим взрывом на производстве является тепловой взрыв. Понятие теплового взрыва вытекает из следующих его определений.

*«Тепловой взрыв – экзотермическая самоускоряющаяся химическая реакция, протекающая с высокой скоростью и сопровождающаяся интенсивным тепло- и газовыделением» [16].*

*«Тепловой взрыв (тепловое самовоспламенение), быстрое нарастание скорости химической реакции, приводящее к воспламенению реакционной смеси без соприкосновения с пламенем или раскаленным телом» [22].*

*«Тепловой взрыв возникает в условиях, когда выделение тепла в результате химической реакции в заданном объеме вещества превышает количество тепла, отводимого через внешнюю поверхность, ограничивающую этот объем, в окружающую среду посредством теплопроводности. Это приводит к саморазогреву вещества вплоть до его самовоспламенения и взрыва» [23].*

*«Автокаталитически-тепловое самоускорение происходит в результате накопления продуктов реакции, катализирующих превращение исходного вещества. Когда достигается перевес прихода*

тепла над его отводом, наступает тепловое самоускорение, заканчивающееся взрывом» [12].

Цепной химический взрыв может предшествовать и приводить к возникновению теплового взрыва. Самостоятельно он происходит при невысоком давлении и не представляет собой такую опасность, как тепловой взрыв. Особенности цепного взрыва отражены в следующих его определениях.

*«Цепной взрыв происходит в условиях, когда в системе возникают в больших концентрациях активные частицы (атомы и радикалы в химических системах, нейтроны – в ядерных), способных вызвать разветвленную цепь превращений неактивных молекул и ядер. В действительности не все активные частицы вызывают реакцию, часть их выходит за пределы объема вещества. Так как число уходящих из объема активных частиц пропорционально поверхности, для цепного взрыва существует так называемая критическая масса, при которой число вновь образующихся активных частиц еще превышает число уходящих» [23].*

*«В случае разветвленных цепных реакций ... происходит быстрое нарастание концентрации активных частиц, скорость реакции экспоненциально растет со временем и может закончиться цепным взрывом.*

*В то же время ... взрывной характер химического процесса вовсе не обязательно связан с разветвленными цепными реакциями: при отсутствии разветвления он может быть обусловлен просто очень большой длиной цепи, как в случае взаимодействия хлора с водородом» [24].*

В литературе встречаются также термины «термохимический взрыв», «термобарический взрыв» без приведения определений. Их использование может быть также отнесено к градации по оказываемому опасному воздействию взрыва: химическому, термическому, барическому.

При исследовании возникновения взрывов различают также условия, при которых они возникают, например, адиабатические тепловые взрывы и тепловые взрывы, протекающие в условиях тепловых потерь.

Приведенные признаки в совокупности определяют идентичность характеристики конкретного взрыва: взрыв может быть, например, аварийным, дефлаграционным, химическим, тепловым, объемным, взрывом газоздушных облаков.

На рис. 1 показана схема взаимосвязи разновидностей аварийных взрывов, рассмотренных в данном разделе.

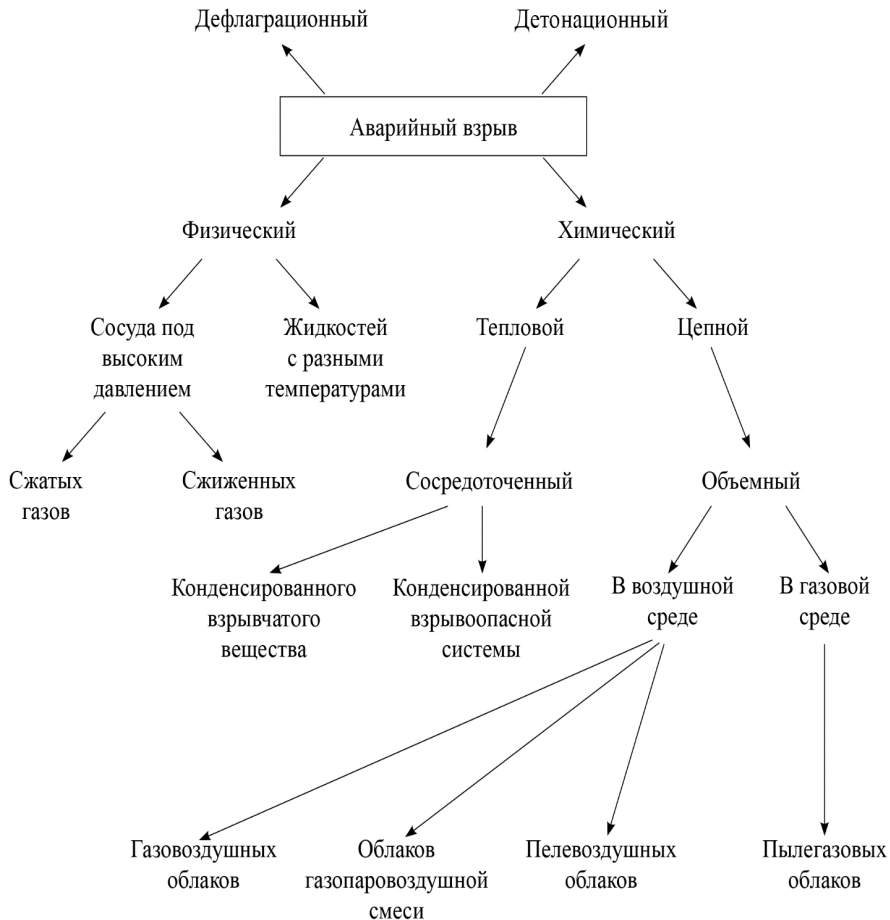


Рис. 1. Схема взаимосвязи разновидностей аварийного взрыва

## 1.2. Основы теории теплового взрыва

Отправной точкой для поиска решения проблемы предотвращения взрывоопасности ОЯТЦ могут служить исходные положения широко используемой в настоящее время теории теплового взрыва, созданной в 1935 г. Н. Н. Семеновым и развитой Д. А. Франк-Каменецким [13, 25].

Согласно этой теории:

– температура самовоспламенения не является физико-химической константой, а зависит от условий теплообмена реакционной системы с окружающей средой;

– скорость химической реакции экспоненциально растет с увеличением температуры, вследствие чего химическая экзотермическая реакция за счет образования нагретых продуктов и повышения температуры реакционной смеси способна самоускоряться;

– самовоспламенение происходит тогда, когда скорость выделения тепла в результате протекания самоускоряющейся химической экзотермической реакции превысит скорость отвода тепла из зоны реакции;

– данным условиям превышения скорости выделения тепла в результате протекания самоускоряющейся химической реакции над скоростью отвода тепла из зоны реакции соответствует определенная температура реакционной системы.

### ***1.2.1. Основные положения теории теплового взрыва***

Совокупность основных положений теории теплового взрыва можно кратко сформулировать следующим образом:

– тепловой взрыв возникает при достижении предельно большого (критического) в данных условиях роста температуры в реакционной химической системе;

– предельно большой рост температуры в реакционной химической системе достигается в результате непрерывного самопроизвольного ускорения химической экзотермической реакции;

– тепловой взрыв происходит по истечении интервала времени (периода индукции) от начала протекания химической экзотермической реакции в реакционной химической системе до достижения в ней предельно большого (критического) роста температуры;

– для достижения предельно большого (критического) роста температуры в реакционной химической системе необходимо, чтобы скорость выделения тепла в результате протекания химической экзотермической реакции превышала скорость отвода тепла из реакционной химической системы;

– предельным условиям, для которых скорость выделения тепла в результате химической экзотермической реакции начинает превышать скорость отвода тепла из реакционной химической системы, соответствуют

предельные значения температуры реакционной химической системы (температуры самовоспламенения).

Многочисленные разновидности формулировок приведенных положений можно найти в научной и учебной литературе, посвященной изложению и анализу теории теплового взрыва, например, в [8, 13, 26].

При рассмотрении приведенных формулировок основных положений теории теплового взрыва следует обратить внимание на следующие аспекты, рассмотренные применительно к каждому из приведенных выше положений.

1. Самоускоряющийся непрерывный рост температуры реакционной химической системы, достигающий своего предела, интуитивно ассоциируется с необратимостью протекания взрывчатого процесса.

Вот что по этому поводу писал основатель теории теплового взрыва [27]: *«самовоспламенение есть результат предпламенной реакции, которая в случае, если она выделяет достаточно много тепла (т. е. если смесь нагрета до соответствующей температуры), чтобы это тепло не успевало отводиться стенками, приводит к бурному росту температуры и скорости реакции, констатируемому нами как взрыв»; «газ будет непрерывно разогреваться, реакция будет идти все быстрее и быстрее, что мы и воспринимаем как взрыв».*

Приведенная цитата служит для объяснения факта свершения теплового взрыва: в результате реакции выделяется много тепла и нагретый газ внезапно расширяется. Вместе с тем здесь отсутствуют критерии возможности возникновения теплового взрыва: какое количество тепла должно выделиться, сколько должно образоваться нагретого газа и т. п.

Согласно данному положению теории теплового взрыва получается, что в любом случае, если в данных условиях будет достигнут предельно большой рост температуры в реакционной химической системе, тепловой взрыв произойдет.

Согласно [28]: *«Тепловой взрыв (тепловое самовоспламенение), быстрое нарастание скорости химической реакции, приводящее к воспламенению реакционной смеси без соприкосновения с пламенем или раскаленным телом. Выделяющееся в экзотермической реакции тепло отводится в окружающее пространство, например, путем конвективной теплопередачи к стенкам реакционного сосуда. При стационарной реакции скорость теплоотвода равна или больше скорости тепловыделения. Однако при некоторых условиях тепло не успевает передаваться*



*в окружающее пространство, вследствие чего температура реагирующей смеси повышается, скорость реакции увеличивается, что приводит к еще большему разогреву смеси. Тепловой взрыв характерен для всех реакций, идущих с достаточно большим выделением тепла и не слишком малой энергией активации».*

2. Способность самопроизвольного ускорения химической экзотермической реакции обусловлена тем, что, в соответствии с уравнением Аррениуса, ее скорость экспоненциально растет с увеличением температуры. Продукты, образующиеся в результате протекания химической экзотермической реакции, имеют более высокую температуру, чем у реагентов.

При отсутствии тепловых потерь (или когда скорость тепловыделения превышает скорость теплоотвода) это приводит к повышению средней температуры реакционной химической системы и, как следствие, к увеличению скорости реакции и скорости тепловыделения. Последующий рост температуры реакционной химической системы приведет к еще большему росту скорости тепловыделения.

Вместе с тем следует учитывать, что эта способность не будет реализована при снижении концентрации реагентов (в том числе в ходе протекания самой экзотермической реакции), диффузионных затруднениях, неоднородности системы и т. п.

Согласно данному положению теории теплового взрыва получается, что в случае возникновения теплового взрыва такие ограничения не оказывают существенного влияния.

3. Наличие периода индукции связано с необходимостью «предвзрывного разогрева» [27] реакционной химической системы до предельно большого роста температуры.

Период индукции относится к самопроизвольному нагреву смеси веществ.

Физико-химическая сущность периода индукции приведена в [14]: *«Явление задержки взрыва...было в новейшее время предметом ряда экспериментальных и теоретических работ, которые приводят к следующему представлению о механизме этого явления.*

*Во взрывчатом веществе, помещенном в баню с повышенной температурой, идет медленное разложение. Это разложение, как известно, имеет ускоряющий характер. Ускорение может иметь различные механизмы. При автокаталитическом распаде оно обуславливается образованием во взрывчатом веществе катализирующих*

процесс продуктов распада, при топочимической реакции увеличивается поверхность зоны контакта продукта реакции с непрореагировавшим веществом, величина которой определяет скорость реакции; при цепном распаде по мере развития разветвляющихся цепей увеличивается число центров цепи и т. д. Помимо того при реакции разложения выделяется тепло. Пока скорость реакции мала, количество выделяющегося в единицу времени тепла мало, оно уходит через стенки сосуда, и температура взрывчатого вещества практически равна температуре бани. Но когда при развитии реакции скорость ее и, следовательно, теплоприход возрастают до некоторого критического значения, при котором тепло уже не успевает отдаваться через стенки, температура взрывчатого вещества повышается; на основной процесс ускорения реакции накладывается тепловое ускорение. В результате чего быстро возникает взрыв. Нужно помнить, однако, что величина скорости реакции определяется не только процессами ускорения, но и количеством оставшегося исходного вещества. Поэтому возможно, если температура бани слишком низка и, соответственно, рост скорости реакции будет идти медленно, что падение ее вследствие исчерпания исходного вещества начнется раньше, чем будет достигнута критическая скорость, дающая превышение теплоприхода над теплоотдачей. В этом случае взрыва не будет. Скорость реакции сначала медленно возрастает, затем падает до нуля. Максимальная температура, при которой возможно это безвзрывное разложение, и является минимальной температурой взрыва. Из сказанного понятно, что величина ее в сильной степени зависит от внешних условий – в первую очередь от условий теплоотдачи).

4. О возможном соотношении скорости выделения тепла в результате протекания химической экзотермической реакции и скорости отвода тепла из реакционной химической системы можно составить представление из следующей цитаты: «скорость теплопотерь линейно зависит от температуры реагирующей смеси. Скорость притока тепла растет по степенному закону с ростом начальных концентраций реагентов и быстро возрастает с увеличением температуры, что является следствием экспоненциальной зависимости скорости химической реакции от температуры» [25].

Частным случаем является отсутствие тепловых потерь из реакционной химической системы в случае протекания химической экзотермической реакции в адиабатических условиях.

Применительно к этому случаю сложилось следующее мнение: «для адиабатических систем теплопередача равна нулю и, таким образом, любая

*экзотермическая адиабатическая система будет взрывоопасна» [25]; «протекание экзотермической химической реакции в изолированной системе всегда завершается тепловым взрывом по истечении периода индукции» [7].*

Данные заключения следует принимать с рядом оговорок: при наличии или образовании в реакционной химической системе определенного количества газообразных веществ; при достижении в реакционной химической системе относительно больших температур и т. п.

Это, например, относится и к радиационно-химическим системам, в которых выделяется радиогенное тепло. В адиабатических условиях возможность теплового взрыва в таких системах отлична от нуля, но не равна единице.

5. Физико-химическая сущность предельных условий, которым соответствуют определенные значения температуры реакционной химической системы, изложена в работе Вант-Гоффа «Очерки по химической динамике», цитаты из которой приведены в [27].

Согласно Вант-Гоффу: *«под термином «воспламенение» я понимаю не только явление взрыва, но и всякое превращение, которое совершается при местном повышении температуры до так называемой температуры воспламенения. В каждом явлении такого рода мы видим, что выполняются следующие условия:*

*1. Превращение, которое дает воспламенение, сопровождается выделением тепла.*

*2. Это превращение происходит уже более или менее медленно при температурах более низких, чем температура воспламенения.*

*3. Это превращение ускоряется при повышенных температурах.*

*При выполнении этих трех условий сможет произойти явление, подобное воспламенению».*

*«Температура воспламенения есть такая температура, при которой начальная потеря тепла, обусловленная теплопроводностью и т. д., равна теплоте, которую за то же время образует превращение».*

В [27] термин «воспламенение» заменен на «самовоспламенение» (так как процесс осуществляется самопроизвольно): *«явление самовоспламенения является следствием температурной зависимости скорости реакции, если учитывать тот разогрев, который возникает в ходе экзотермической реакции и который приводит к тому, что температура смеси меняется со временем».*

Обоснование наличия и физико-химической сущности температурных границ самовоспламенения имеет принципиальное значение. Как отмечено в [8], *«теория доказывает, что температура самовоспламенения не является физико-химической константой*

газовоздушной смеси, а зависит от условий теплообмена газовой смеси с внешней средой. Этот факт очень важен, так как долгое время температуру самовоспламенения считали физико-химической константой».

*«На самом деле самовоспламенение зависит от формы и размеров сосуда, теплопроводности газа и т. д., т. е. не только от скорости химической реакции» [13].*

Видоизмененный график, приведенный в работе Вант-Гоффа, для иллюстрации сущности температуры воспламенения (самовоспламенения), показан на рис. 2.

В соответствии с рис. 2, при нагреве химической системы 2, в которой протекает экзотермическая реакция, до температуры ниже температуры самовоспламенения и последующем отключении нагрева химическая система будет охлаждаться несколько более медленно из-за сохраняющегося тепловыделения, по сравнению с системой 1, в которой не протекает экзотермическая реакция. При нагреве до температуры выше температуры самовоспламенения и последующем отключении внешнего нагрева система 1 начнет охлаждаться, а система 2 – повышать температуру. При нагреве до температуры самовоспламенения и отключении внешнего нагрева температура системы 1 начнет понижаться, а температура системы 2 – сохранять постоянное значение из-за равенства тепловыделения в ходе протекания экзотермической реакции и отвода тепла из реакционной системы в окружающую среду.

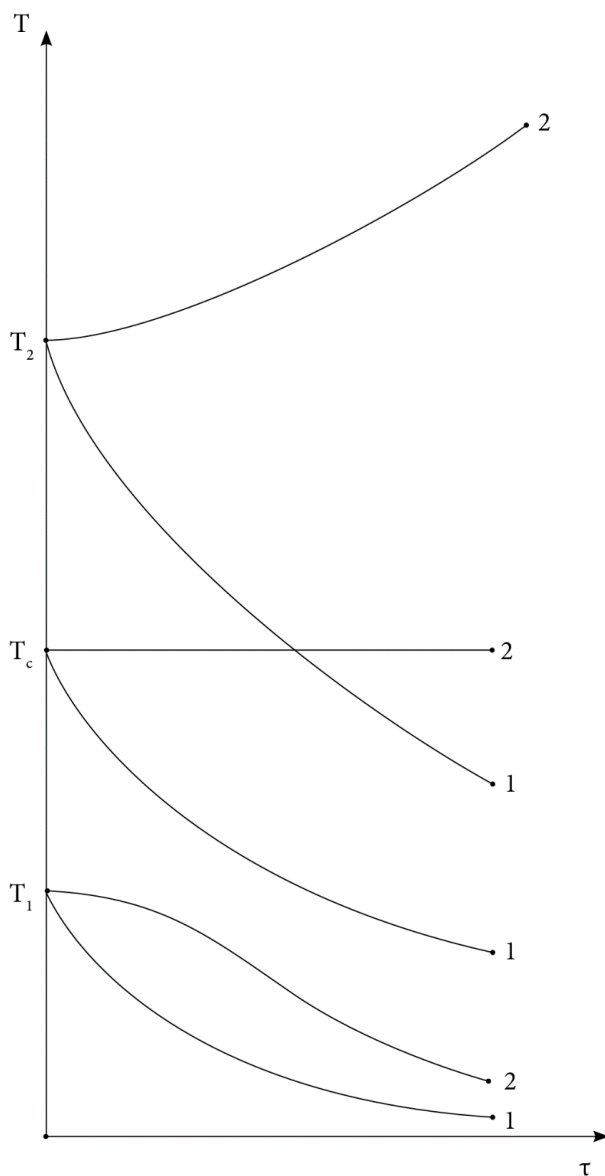


Рис. 2. Определение температуры самовоспламенения по Вант-Гоффу на основании типа зависимости изменения температуры от времени в системах с экзотермической реакцией (2) и без нее (1)

### 1.2.2. Элементы математической модели теплового взрыва

При создании теории теплового взрыва Н. Н. Семенов использовал следующую модель реакционной химической системы:

- гомогенная газовая смесь с начальной температурой  $T_n$  находится в сосуде объемом  $V$  с поверхностью  $S$ ;
- скорость протекания химической экзотермической реакции подчиняется закону действующих масс и уравнению Аррениуса:

$$v = k_0 e^{-E/RT} c^n, \quad (1)$$

- где  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель;  
 $E$  – энергия активации;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная;  
 $T$  – температура;  
 $c$  – текущая концентрация реагента;  
 $n$  – порядок реакции.

В другой записи:

$$v = k_0 e^{-E/RT} (n_0 - n)^n, \quad (2)$$

- где  $n_0$  – исходное количество реагента;  
 $n$  – количество прореагировавшего реагента;  
– количество тепла, выделяемое в результате протекания реакции в единицу времени:

$$q_1 = dQ_p/d\tau = Q_p k_0 e^{-E/RT} c^n, \quad (3)$$

- где  $Q_p$  – тепловой эффект реакции;  
 $\tau$  – время;  
– количество тепла, отводимое от сосуда в окружающее пространство, подчиняется закону Ньютона:

$$q_2 = dQ_{\text{пот}}/d\tau = k (T - T_0) S, \quad (4)$$

- где  $Q_{\text{пот}}$  – количество тепла, отводимое из реакционной системы;

$k$  – коэффициент теплопередачи из реакционной системы в окружающее пространство;

$T_0$  – температура стенок сосуда, задаваемая извне.

В соответствии с (3) и (4) скорость изменения температуры реакционной системы с течением времени определяется уравнением:

$$\rho c_p dT/dt = q_1 - q_2, \quad (5)$$

где  $\rho$  – плотность газовой смеси;

$c_p$  – теплоемкость газовой смеси.

Основные замечания по модели теплового взрыва Н. Н. Семёнова сводятся к следующему.

*«В своем анализе теплового взрыва Семенов (1935) рассматривает пространственно однородную систему, т. е. систему с постоянным давлением, температурой и составом смеси. Кроме того, химические процессы аппроксимировались одностадийной реакцией первого порядка» [25].*

*«Для описания потока тепла в окружающее пространство используется закон Ньютона для теплообмена.*

*Это достаточно простой подход (в стационарном состоянии не требуется рассматривать дифференциальное уравнение), но ценой подобной простоты является то обстоятельство, что коэффициент теплоотдачи зависит от фактических условий, особенно от геометрии» [25].*

Данная модель получила развитие в работе Д. А. Франк-Каменецкого в 1955 г.

*«Анализ теплового взрыва Франк-Каменецкого расширяет анализ теплового взрыва Семёнова путем замены закона Ньютона для теплопередачи на более реалистичный закон Фурье, который допускает перенос энергии в системе к стенкам сосуда. Как следствие, температура в системе неоднородна. Для простоты рассмотрение ограничено одномерной геометрией (плоской, цилиндрической и сферической)» [25].*

*«Для удобства дальнейших расчетов Д. А. Франк-Каменецкий предложил упростить уравнение путем замены экспоненты на степенную функцию, используя ряд Тэйлора и ограничиваясь его первым членом» [8].*

*«Недостатком анализа теплового взрыва по Франк-Каменецкому является допущение о том, что реагенты не расходуются. Улучшение*

данного подхода связаны главным образом с отказом от этого допущения» [25].

Уравнение Франк-Каменецкого для процесса, имеющего скорость нулевого порядка, имеет вид:

$$-\lambda^2 + \rho c \partial T / \partial \tau = \rho Q Z e^{-E/RT}, \quad (6)$$

где  $T$  – температура;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\rho$  – плотность;  
 $c$  – теплоемкость;  
 $Q$  – теплота разложения;  
 $Z$  – число столкновений;  
 $E$  – энергия активации;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная;  
 $\tau$  – время.

Франк-Каменецкий решил свое уравнение для стационарного случая  $\partial T / \partial \tau = 0$  и получил следующее соотношение, связывающее критическую температуру и определяющее ее физические параметры:

$$T_m = E / (2/303 \lg[\rho a^2 Q Z E / (\lambda R T_m^2 \delta)]), \quad (7)$$

где  $\delta = 0,88$  для плоского слоя,  $\delta = 2,00$  для цилиндра и  $\delta = 3,32$  для шара;

$a$  – размер (радиус).

### 1.2.3. Диаграмма Семёнова

Приведенные в разделе 1.2.1 положения теории теплового взрыва наглядно иллюстрирует диаграмма Семёнова (рис. 3).

Кривая В на рис. 3 изображает скорость тепловыделения в реакционной системе с увеличением температуры. Тепловыделение в результате протекания химической экзотермической реакции начинается при температуре  $T_0$  (с ненулевой начальной скоростью) и возрастает по экспоненциальной зависимости от температуры.



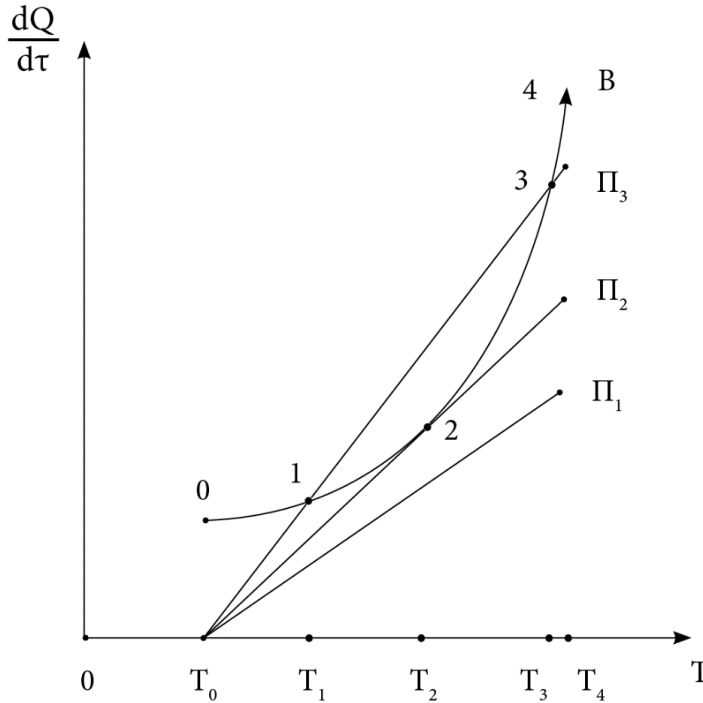


Рис. 3. Взаимное расположение зависимостей тепловыделения ( $B$ ) и тепловых потерь ( $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ,  $\Pi_3$ ) от температуры реагирующей химической системы на диаграмме Семёнова

Линейные зависимости скорости изменения тепловых потерь от температуры изображены на рис. 3 в соответствии с законом Ньютона. Тепловые потери от реакционной системы начинают происходить при температуре  $T_0$  сразу же после начала протекания химической экзотермической реакции.

При малых скоростях теплоотвода от реакционной системы (прямая  $\Pi_1$  на рис. 3) скорость тепловыделения будет во всем интервале температур превышать скорость теплоотвода, что с течением времени, согласно данной теории, приведет к прогрессивному росту температуры и тепловому взрыву.

Если тепловые потери от реакционной системы возрастут и сравняются с тепловыделением в реакционной системе (прямая  $\Pi_2$  на рис. 3) при температуре  $T_2$ , то эта температура будет предельной с точки зрения возможности возникновения теплового взрыва.

Если скорость тепловых потерь превышает скорость тепловыделения (участок 1–3 линии  $\Pi_3$  на рис. 3), то тепловой взрыв становится невозможным вплоть до температуры  $T_3$ , при достижении которой тепловыделение начинает превышать тепловые потери от реакционной системы.

На рис. 3 линия тепловых потерь пересекает кривую тепловыделения в двух точках: 1 и 3. В точке 1 состояние реакционной системы является устойчивым. Это обусловлено тем, что если температура системы опустится ниже значения  $T_1$ , то по реакции будет выделяться больше тепла, чем отводиться из реакционной системы, и она снова придет в состояние 1. С другой стороны, если температура системы поднимется выше значения  $T_1$ , то тепла будет отводиться больше, чем выделяться по реакции, и система возвратится в состояние 1.

Наоборот, в точке 3 состояние реакционной системы является неустойчивым: при снижении температуры ее состояние будет переходить в точку 1, а при превышении значения  $T_3$  температура в системе будет прогрессивно возрастать вплоть до возникновения теплового взрыва.

Характер изменения температуры реакционной системы со временем для рассмотренных случаев приведен на рис. 4.

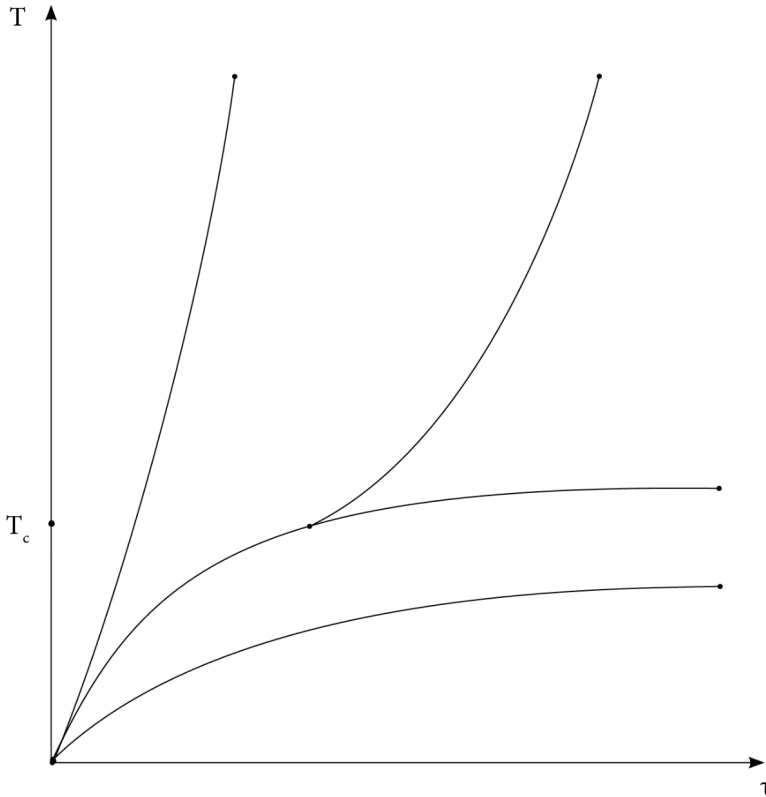


Рис. 4. Режимы изменения температуры реакционной системы во времени

Как видно из рис. 4, при температуре реагирующей системы ниже температуры самовоспламенения ( $T_c$ ) кривые выходят на плато (максимум), и по мере протекания реакции температура из-за тепловых потерь будет снижаться. При этом с увеличением температуры реакционной системы время до завершения реакции будет снижаться, так как ее скорость увеличивается с увеличением температуры. Соответственно, при температуре реагирующей системы равной или выше температуры самовоспламенения имеет место резкое увеличение температуры, приводящее к тепловому взрыву, причем с увеличением температуры реагирующей системы период индукции до возникновения теплового взрыва снижается.

Из диаграммы Семёнова следует, что температура  $T_2$  является минимально возможной в данных условиях температурой самовоспламенения реагирующей системы. С увеличением тепловых потерь температура самовоспламенения будет возрастать (значение  $T_3$ ), приближаясь к температуре  $T_4$ , достижение которой приводит к тепловому взрыву.

#### **1.2.4. Влияние технологических параметров на условия возникновения теплового взрыва**

В соответствии с условиями, необходимыми для возникновения теплового взрыва:

$$dQ_p/d\tau > dQ_{пот}/d\tau, \quad (8)$$

или

$$Q_p k_0 e^{-E/RT} c^n V > \alpha(T - T_0) S, \quad (9)$$

можно выделить следующие группы параметров, влияющих на условия возникновения теплового взрыва:

- температура окружающей среды  $T_0$ ;
- показатели теплопередачи: коэффициент теплоотдачи от стенки сосуда  $\alpha$  (коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , коэффициент температуропроводности  $a$ , теплоемкость  $c$ );
- концентрационные показатели: концентрация  $C$ , давление газов в системе  $P$ , соотношение реагентов  $\varphi$ , плотность реакционной системы  $\rho$ );
- геометрические показатели: поверхность теплоотдачи  $S$ ; отношение поверхности к объему сосуда  $S/V$ ; диаметр сосуда  $d$ ).

Характер влияния этих параметров на условия возникновения теплового взрыва показан на диаграмме Семёнова (рис. 5–7).

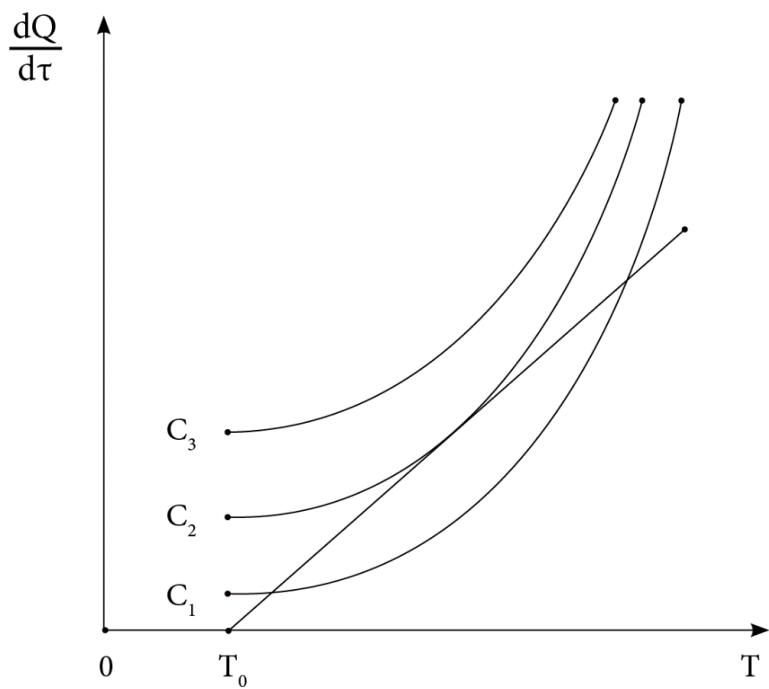


Рис. 5. Влияние концентрации реагента ( $C_3 > C_2 > C_1$ ) на тепловыделение на диаграмме Семёнова

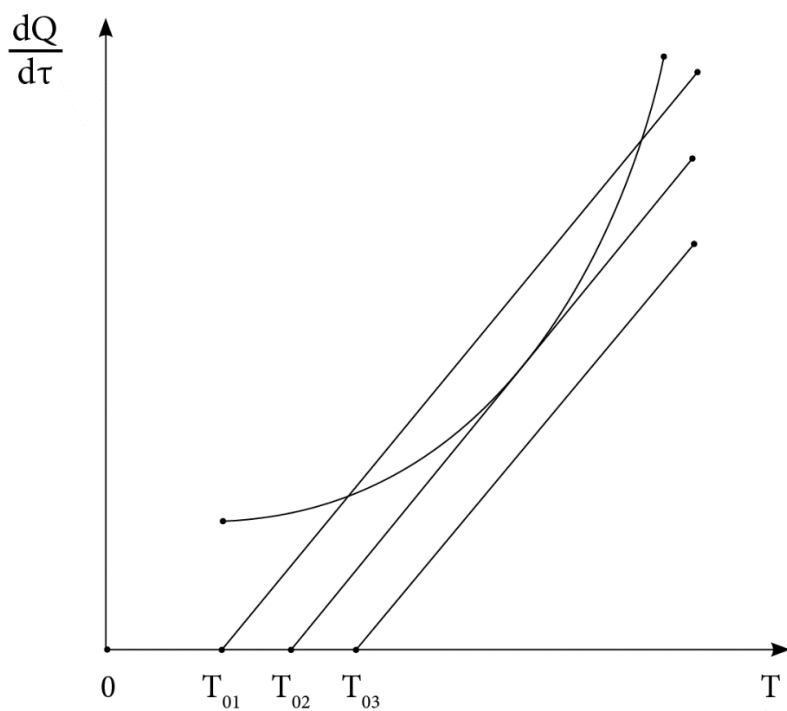


Рис. 6. Влияние температуры окружающей среды ( $T_{03} > T_{02} > T_{01}$ ) на теплотери на диаграмме Семёнова

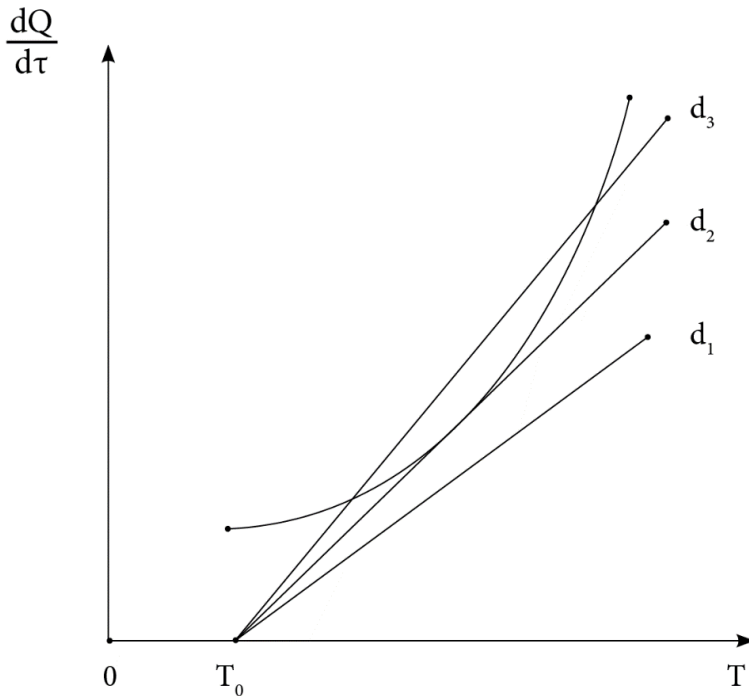


Рис. 7. Влияние коэффициента теплопередачи ( $\alpha_3 > \alpha_2 > \alpha_1$ ) на теплотери на диаграмме Семёнова

На рис. 5 показано, что при неизменных условиях теплоотвода увеличение концентрации реагентов (или давления газов в реакционной системе) способствует протеканию химической экзотермической реакции в режиме теплового взрыва.

Для данной зависимости тепловыделения в реакционной системе, повышение температуры окружающей среды и снижение коэффициента теплопередачи от реакционной системы в окружающую среду (рис. 6, 7) также способствуют созданию условий для возникновения теплового взрыва.

### 1.2.5. Границы применимости теории теплового взрыва

В научной и учебной литературе приведены следующие ограничения, в пределах которых применима теория теплового взрыва:

– «эта простая теория применима лишь при малых степенях выгорания реагентов» [7];

– «если теплообмен в реагирующей системе быстрее, чем теплообмен с окружающим пространством (со стенками сосуда и тому подобное), то больше подходит теория Семёнова. Теория Франк-Каменецкого лучше описывает процессы воспламенения в тех случаях, когда теплообмен с окружающим пространством быстрее, чем теплообмен внутри реагирующей системы» [25];

– «недостатком анализа теплового взрыва по Франк-Каменецкому является допущение о том, что реагенты не расходуются. Улучшение данного подхода связано, главным образом, с отказом от этого допущения» [25];

– «модель академика Н. Н. Семёнова имеет существенный недостаток, так как пренебрегает неоднородностью температур по объему газовой смеси, в которой происходит химическая реакция. Поэтому в дальнейшем Д. А. Франк-Каменецкий и другие исследователи предложили более совершенные модели» [8];

– «Рассмотрение критических режимов стационарного протекания экзотермической химической реакции в условиях теплоотвода, предложенное Н. Н. Семёновым, обосновано в случае определенных предположений относительно характера зависимости скорости реакции от температуры и ее теплового эффекта, которые, правда, обычно всегда выполняются для большинства химических реакций. Именно, должен быть большим тепловой эффект химической реакции и должна быть большой энергия активации» [13];

– «теория Н. Н. Семёнова является асимптотически справедливой в том пределе, когда энергия активации и теплота реакции велики по сравнению с энергией теплового движения в исходной горючей смеси» [13];

– «предложенную асимптотику можно применять лишь в ограниченном интервале температур. Для описания полного поведения во времени воспламеняющейся системы она не годится» [13].



## 1.3. Основы теории цепного взрыва

### 1.3.1. Основные положения теории цепного взрыва

Теория цепного взрыва является составной частью теории цепных процессов, существенный вклад в развитие которой внесли лауреаты Нобелевской премии 1956 г. Н. Н. Семёнов и С. Хиншельвуд.

Совокупность основных положений теории цепного взрыва можно кратко сформулировать следующим образом:

1. Цепной взрыв возникает в результате протекания цепной реакции. Цепная реакция представляет собой последовательность (так называемую цепь) циклов элементарных химических актов, каждый из которых начинается взаимодействием молекулы одного реагента с химически активной частицей (радикалом, атомом), предварительно образующейся при разложении молекулы другого реагента, и заканчивается (наряду с получением конечных продуктов реакции) регенерацией этой активной частицы, дающей начало новому химическому циклу.

2. Цепной взрыв обусловлен способностью цепных реакций самоускоряться с течением времени.

Эта способность реализуется вследствие накопления (в конкурирующих процессах образования и расходования или «гибели») и последующего прогрессивного роста концентрации химически активных частиц (при разветвлении или удлинении цепи), с увеличением которой, согласно закону действующих масс, увеличивается скорость реакции.

Для достижения предельно большого роста концентрации химически активных частиц в реакционной химической системе необходимо, чтобы скорость образования химически активных частиц превышала скорость их превращения в химически неактивные частицы (скорость их гибели).

Предельно большой рост концентрации химически активных частиц в реакционной химической системе достигается в результате протекания разветвленной цепной реакции.

3. Способность цепных реакций самоускоряться с течением времени становится возможной при определенных значениях параметров состояния реакционной системы (давления, температуры и др.) и ее граничных условий (геометрических размеров, характеристик поверхности вмещающего сосуда).

4. Цепной взрыв происходит при достижении критического значения ускорения цепной химической реакции, соответствующего критическому значению скорости нарастания давления в реакционной системе. Цепной взрыв возникает при достижении предельно большого в данных условиях роста концентрации химически активных частиц в реакционной химической системе;

5. Цепной взрыв происходит по истечении интервала времени (периода индукции) от начала протекания цепной реакции до достижения критического значения ее ускорения.

Разнообразные аспекты теории цепного взрыва, относящиеся к приведенным пунктам формулировок, отмечены, например, авторами следующих цитат.

1) *«Цепной взрыв – цепная реакция, в которой появление активной частицы вызывает большое число превращений неактивных молекул в активные вследствие регенерации активной частицы в каждом элементарном акте реакции»* [26].

*«В действительности реакции протекают не непосредственно между молекулами исходных веществ, а через стадии, в которых образуются промежуточные высокоактивные продукты, легко вступающие в реакции с молекулами горючего и окислителя, разрушая их и образуя конечные продукты»* [8].

*«Под термином «активные частицы» понимают свободные атомы, ионы, радикалы и молекулы. Свободные радикалы – частицы, имеющие хотя бы один не спаренный электрон на внешней орбите»* [26].

*«Что касается природы индуктора, то она может быть самой разнообразной.*

*Расщепление  $Cl_2$  на 2  $Cl$  (индуктор) идет или при соударении молекул с большой кинетической энергией, или под действием светового кванта»* [29].

*«Роль активных центров при цепном превращении могут также играть молекулы, содержащие избыточный запас энергии, возникший в результате определенных химических актов.*

*Такой тип цепных реакций называют реакциями с энергетическими цепями»* [13].

*«Большей частью активными промежуточными продуктами являются свободные радикалы, атомы и другие неустойчивые промежуточные соединения, обладающие повышенной химической активностью.*

*Химически активные частицы, образующиеся при реализации элементарных стадий реакции, носят название активных центров, а сами стадии – звенья цепи» [8].*

Согласно [30]:

*– «скорость реакции зарождения цепей (т. е. скорость процесса, приводящего к возникновению активных центров – носителей цепей) ничтожно мала. Она во всяком случае намного ниже наименьших значений скорости, доступных кинетическим измерениям;*

*– цепи имеют материальный характер, т. е. осуществляются через посредство атомов и радикалов, вступающих в реакцию; предполагалось, что развитие цепей за счет богатых энергией молекул невозможно;*

*– активные центры – атомы и радикалы – могут вступать в реакции трех видов:*

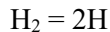
*а) продолжения цепей – реакции, при которых в ходе одного элементарного акта образуется столько же активных частиц, сколько и вступает в него;*

*б) разветвления цепей – реакции, в результате которых количество активных центров в системе увеличивается;*

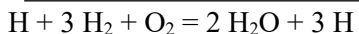
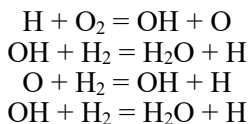
*в) обрыва цепи – реакции (гомогенные или гетерогенные), в результате которых происходит уничтожение активных центров, превращение их в стабильные молекулы».*

Стадии цепного разветвленного процесса можно представить на примере цепного взрыва водорода, который является одним из основных взрывоопасных веществ на ОЯТЦ, в виде следующих основных химических актов [13, 30]:

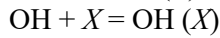
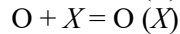
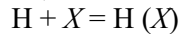
– зарождение цепи:



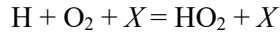
– продолжение и разветвление цепи:



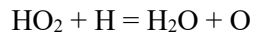
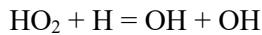
– гетерогенный обрыв цепей (снижение энергии) на стенках сосуда:



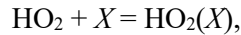
– гомогенный обрыв цепей (снижение энергии) в объеме газовой фазы:



– разветвление цепи, сопровождающееся экзотермическим эффектом:



– гетерогенный обрыв цепей, сопровождающихся экзотермическим эффектом:



где  $X$  – материал внутренней стенки сосуда или частица газовой смеси.

Схема разветвления активных центров по приведенным реакциям представлена на рис. 8. Согласно этой схеме при зарождении цепи одной химически активной частицей через 5 циклов размножения в реакционной системе будут находиться 13 активных частиц, способных продолжать цепи превращений: через 10 циклов размножения – 144 активные частицы, через 20 циклов – 17 711, через 25 циклов – 196 418 активных частиц.

2) «Разветвленные цепные реакции могут происходить в стационарном режиме (скорость разветвления меньше скорости гибели активных частиц) и в нестационарном (гибель происходит медленнее, чем разветвление). В последнем случае скорость цепной реакции стремительно (экспоненциально) возрастает и лимитируется только расходом исходных веществ. Переход от стационарного к нестационарному режиму происходит скачком при изменении концентрации одного из исходных веществ. Так, при окислении  $\text{H}_2$  увеличение концентрации  $\text{O}_2$  на несколько процентов приводит к ускорению реакции в тысячи раз. Такое быстрое ускорение рассматривается как самовоспламенение реакционной смеси, или цепной взрыв» [23].

«Возникновение цепного взрыва объясняется лавинообразным нарастанием числа активных частиц (свободных радикалов) в результате протекания разветвленной цепной реакции» [26].

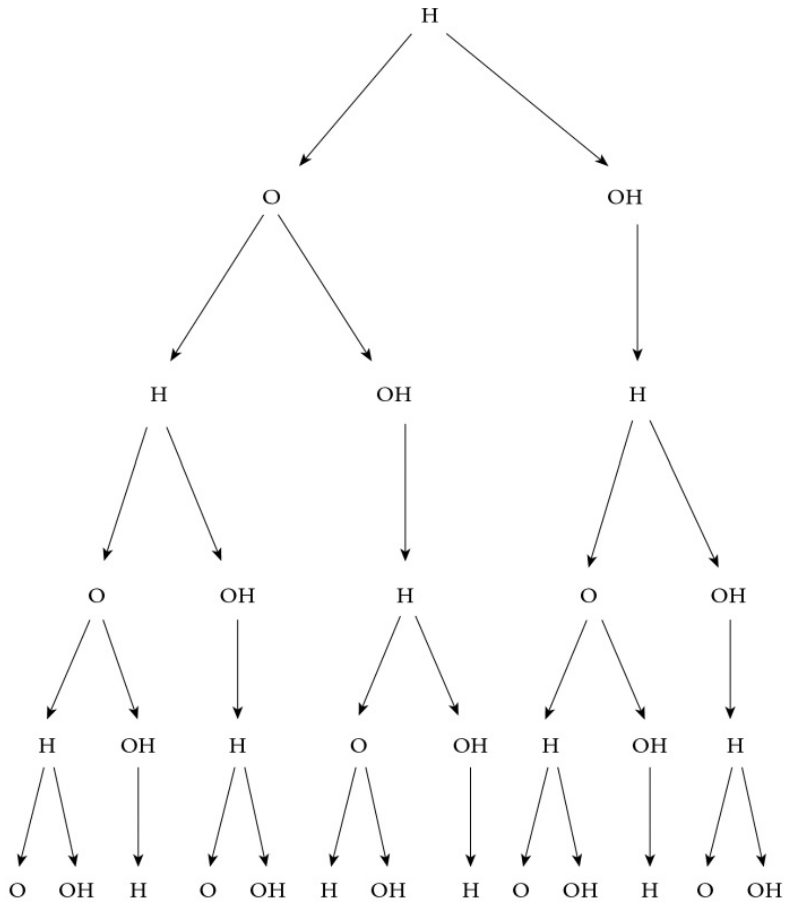


Рис. 8. Схема разветвления активных центров

«Цепные реакции и прежде всего разветвленные цепные реакции следует рассматривать как весьма наглядные примеры сложных химических процессов, большая скорость которых (по сравнению, например, с соответствующей простой моно-, би- или тримолекулярной реакцией) обусловлена возможностью частичного использования энергии, выделяющейся при образовании конечного продукта, на ускорение процесса» [30].

«Существование повышенных сверхравновесных концентраций свободных радикалов в ходе цепных процессов обусловлено наличием своеобразной «обратной связи» – взаимодействия между стадиями,

в которых энергия реакции превращается в тепло, и стадиями, в которых происходит активация молекул, вступающих в реакцию» [30].

«Общую картину протекания реакции с разветвленными цепями можно представить себе следующим образом. Активные центры непрерывно поставляются (с очень малой скоростью) реакцией зарождения цепей. Вступая в реакцию продолжения, они приводят к возникновению реакционных цепей; последние заканчиваются при реакции обрыва. Несмотря на то, что в ходе такой прямой цепи образуется значительное количество молекул конечного продукта, скорость реакции зарождения столь мала, что суммарная скорость реакции оказывается ничтожно малой. Если же наряду с реакцией продолжения цепи будет происходить реакция разветвления, то возможны два случая:

1. Разветвление цепей происходит реже, чем их обрыв. Длина цепи при этом несколько увеличивается, что, однако, не меняет качественную картину процесса.

2. Разветвления цепей происходят чаще, чем обрывы. Это означает, что начавшаяся цепь реакций не может остановиться (пока в системе есть еще неизрасходованное исходное вещество), так как на каждый акт обрыва и гибели цепи приходится более чем один акт разветвления. Происходит лавинообразное накопление активных веществ; процесс имеет нестационарный характер, скорость его увеличивается от очень малых до очень больших значений. Нарастание скорости лимитируется расходом исходного вещества. Вся реакция завершается теперь за малые доли секунды» [30].

3. «Критерием эффективности обратной связи может служить возможность протекания самоподдерживающейся цепной реакции в отсутствие зарождения цепей. Такое протекание реакции характерно только для разветвленных цепных процессов внутри области воспламенения, когда в принципе можно достичь 100 %-го превращения исходя из одного исходного первичного активного центра. Развитие же неразветвленной цепной реакции в разветвленной реакции вне области воспламенения возможно только при наличии постоянно протекающего процесса зарождения цепей, обратная связь в этих случаях недостаточно эффективна для поддержания непрерывно осуществляющегося процесса» [30].

«В условиях конденсированной среды, когда каждый элементарный акт сопровождается изменением очень слабых, но весьма многочисленных

*и разнообразных взаимодействий реагирующих частиц с окружающей средой, число таких механизмов с обратной связью должно резко увеличиваться» [30].*

В [13] отмечена «возможность цепного воспламенения в изотермических условиях».

4. «Условием взрыва является достижение скоростью некоторого постоянного для данных условий критического значения» [14].

«При рассмотрении различного рода сопряжений в цепном процессе необходимо учитывать следующие два важнейших факта: накопление с течением времени малоактивных частиц, возникающих в начальных стадиях процесса, и активирование их активными частицами, что приводит к автогенезису цепных взрывов» [29].

5. «В цепных процессах, инициированных первичной заправкой, тепловое автоускорение в периоде индукции не сказывается; наоборот, в цепных реакциях, инициируемых первичной реакцией, тепловое автоускорение играет существенную роль. Именно в этом втором случае, даже если цепной процесс был затухающим... произойдет взрыв, вызванный дополнительным термическим автоускорением.

В первых процессах период индукции не меняется под влиянием термического автоускорения, во-вторых – меняется» [29].

«Во время периода индукции химическая реакция идет, но столь медленно, что мы не можем ее наблюдать, а концентрация активных центров, вполне определенная физическая величина, все время возрастает. Согласно этим представлениям смесь, находившаяся в сосуде некоторое время, меньшее чем период индукции, должна отличаться от исходной тем, что в ней присутствует некоторое количество активных центров. Если (такую) взрывную смесь ... смешать со свежей взрывчатой смесью, то оказывается, что период индукции этой смеси сильно сокращается. Действительно, в системе, полученной после смешения, заранее задано некоторое количество активных центров, и скорость начинает увеличиваться с большего начального значения, реакция быстрее достигает величины (скорости), доступной нашим измерительным методам» [13].

«Пределы самовозгорания  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  соответствуют периоду самовозгорания  $\tau$ , равному бесконечности. Если газовая смесь находится при температуре, соответствующей какой-то точке, лежащей на пределе самовозгорания, принципиально самовозгорание возможно, но практически его не будет, потому что период самовозгорания  $\tau$  здесь равен бесконечности. Только при переходе в область полуострова

самовозгорания или в область выше  $s_3$  период самовозгорания становится конечным и положительным» [29].

### 1.3.2. Элементы математической модели цепного взрыва

В модели цепного взрыва используют следующие основные исходные формулы.

Скорость изменения концентрации активных центров ( $n$ ) во времени ( $\tau$ ) имеет вид [13]:

$$dn/d\tau = W_0 + fn - gn = W_0 + (f - g)n = W_0 + \varphi n, \quad (10)$$

где  $W_0$  – скорость зарождения активных центров;

$f$  и  $g$  – константы скоростей процессов разветвления и обрыва цепей.

Изменение концентрации активных центров во времени с учетом условий  $n = 0$  при  $\tau = 0$ :

$$n = W_0 / \varphi (e^{\varphi\tau} - 1). \quad (11)$$

Скорость образования конечных продуктов равна [13]:

$$W = \nu fn = \nu f W_0 / \varphi (e^{\varphi\tau} - 1), \quad (12)$$

где  $\nu$  – целое число порядка единицы, обозначающее, сколько молекул конечного продукта образуется в результате вступления в реакцию одного активного центра.

При  $W_0 \ll W_{\min}$ :

$$W = (\nu f W_0 / \varphi) e^{\varphi\tau}, \quad (13)$$

где  $W_{\min}$  – наименьшая скорость реакции, которую можно определить измерительными методами.

При  $f \gg g$ :

$$W \sim \nu W_0 e^{\varphi\tau}. \quad (14)$$



При  $\varphi = f - g = 0$ :

$$W \sim \nu W_0 f \tau. \quad (15)$$

При  $\varphi < 0$ :

$$W \rightarrow \nu f W_0 / \varphi / < W_{min}. \quad (16)$$

### 1.3.3. Диаграмма трех пределов

Базовой зависимостью в теории цепного взрыва является диаграмма трех пределов самовоспламенения (взрыва) для газовой смеси. На этой диаграмме в координатах «давление – температура» изображают линию, которая ограничивает область значений давления и температуры, попадание в которую приводит к самовоспламенению реакционной смеси и цепному взрыву.

Вид зависимости между граничными значениями давления и температуры реагентов цепной реакции схематично показан на рис. 9. Линия, изображающая эту зависимость, состоит из трех сопряженных отрезков: *ab*, *bc*, *cd*, которые получили название, соответственно: первого, второго и третьего пределов самовоспламенения (взрыва).

Физико-химическая сущность трех пределов самовоспламенения (взрыва) состоит в следующем [13, 25, 30].

Пусть значение температуры исходной газовой смеси равна  $T_3$ , а значение давления меньше  $P_1$ . Начнем при этой температуре повышать давление в реакционной смеси.

В области низких давлений (ниже участка *ab* на рис. 9), характеризуемой низкой частотой столкновения частиц газовой смеси, образующиеся в относительно небольшом количестве химически активные частицы, способные образовывать разветвленные цепи превращений, успевают диффундировать к поверхности реакционного сосуда и, отдавая энергию, превращаться там в химически малоактивные частицы. В результате этого произойдет гетерогенный обрыв цепей на стенках сосуда.

При превышении давления в системе значения  $P_1$  (выше первого предела) скорость образования химически активных частиц вследствие увеличения числа столкновений становится выше скорости их диффузии

к стенкам сосуда. В результате протекания процессов разветвления цепей с их участием реакция переходит в режим цепного взрыва.

Если температуру исходной реакционной смеси снизить до значения  $T_1$ , затем увеличить давление до значения  $P_4$  и поднять температуру при этом давлении снова до  $T_3$ , то цепного взрыва не произойдет. При переходе через второй предел (участок  $bc$  на рис. 9) в реакционной системе из-за дальнейшего роста давления (в диапазоне  $P_3 - P_5$  при  $T_3$ ) начнет преобладать процесс тройного (в том числе, например, с небольшим временным интервалом сначала двойного, а затем еще одного) столкновения с участием химически активных частиц и превращение их в химически малоактивные частицы. В результате этого произойдет гомогенный обрыв цепей в газовой фазе.

При дальнейшем увеличении давления выше значения  $P_5$  при заданной температуре  $T_3$  (выше третьего предела) интенсивность столкновений частиц настолько возрастает, что в реакцию начинают вступать химически менее активные частицы, взаимодействия которых сопровождаются экзотермическими эффектами. В результате этого по мере роста цепей и увеличения числа химических актов возрастет и тепловыделение в реакционной смеси, которое при превышении теплоотвода через поверхность реакционного сосуда создает условия для возникновения совместного цепного и теплового взрыва.

Согласно приведенной на рис. 9 диаграмме, при любом значении давления (достигаемом в обычных производственных процессах) увеличение температуры в реакционной системе приведет к цепному или тепловому взрыву.

Соответственно, увеличение давления при температуре реакционной смеси  $T_1$  приведет к взрыву при превышении только третьего предела, а при температуре  $T_5$  – только первого предела самовоспламенения (взрыва). Граничными вариантами при этом являются случаи повышения давления при значениях температуры, соответственно:  $T_2$  и  $T_4$ .

Из рассмотрения диаграммы трех пределов следует, что возможность возникновения цепного взрыва определяется траекторией совместного изменения температуры и давления исходной реакционной смеси. При этом следует также учитывать, что при относительно высоком (атмосферном и выше) давлении в реакционной системе развитие цепной реакции способно привести к тепловому взрыву.

В [29] показано, что рассмотренный вид зависимости можно отнести к различным режимам протекания реакции: воспламенения (зажигания), самовоспламенения, взрыва и зависимости, соответствующие этим режимам, которые представляют собой в первом приближении серию параллельных

линий. Вместе с тем в [29] отмечено, что вид этих зависимостей лишь приближено повторяет друг друга.

На рис. 10 области протекания реакции в безопасном режиме, режимах воспламенения, самовоспламенения и взрыва обозначены, соответственно, как I, II, III, IV.

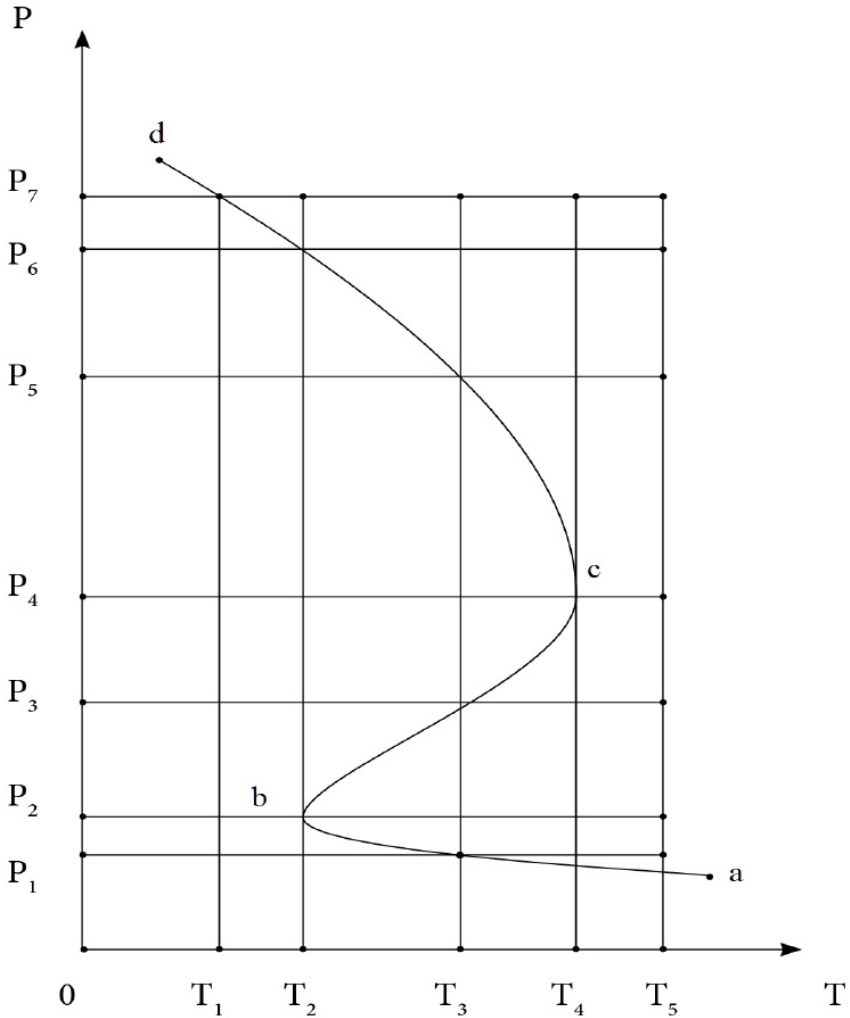


Рис. 9. Диаграмма трех пределов самовоспламенения (взрыва)

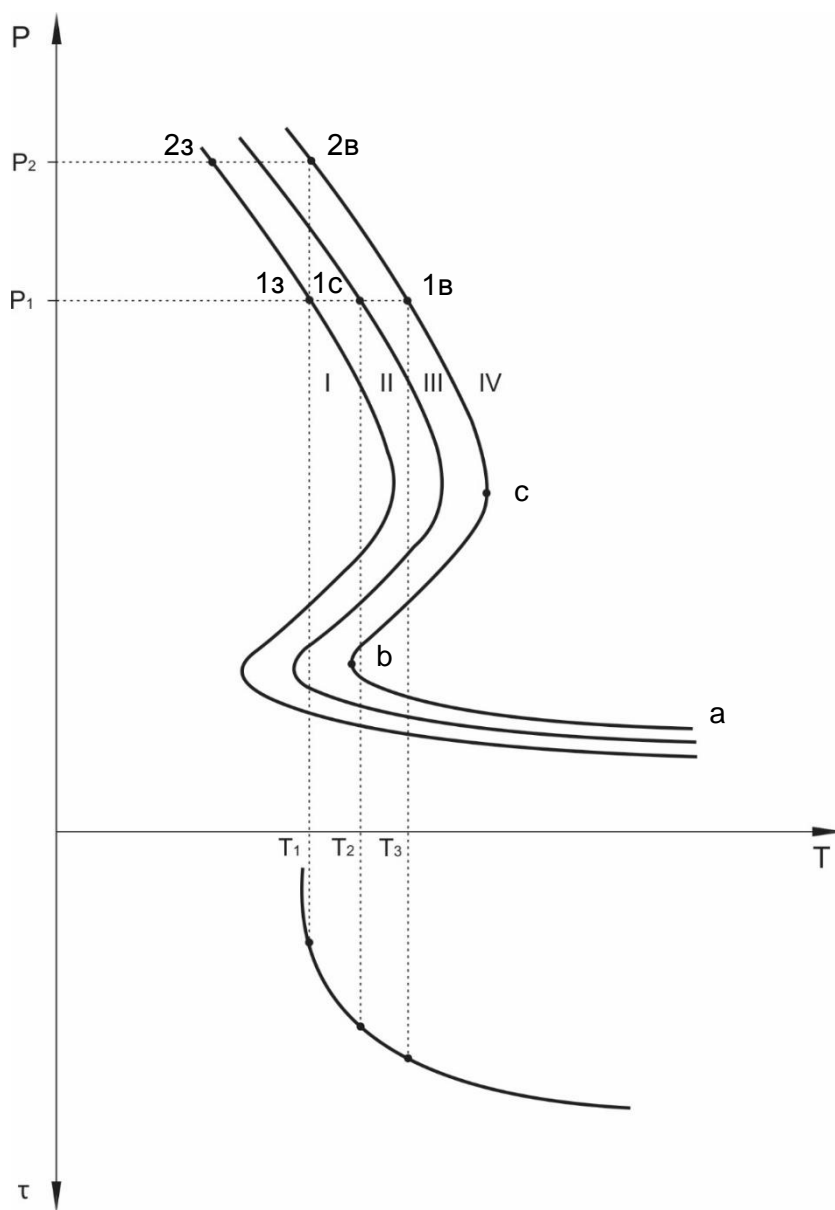


Рис. 10. Режимы протекания химической экзотермической реакции и характер изменения температуры продуктов реакции во времени

Такое взаимное расположение предельных зависимостей соответствует последовательности экспериментально определяемых температурных показателей пожаровзрывоопасности. Например, для трибутилфосфа (ТБФ) температура вспышки равна: 114 °С, температура воспламенения: 175 °С, температура самовоспламенения: 344 °С [31].

Таким образом, если процесс проводится при постоянном давлении ( $P_1$  на рис. 10), при увеличении температуры химическая экзотермическая реакция последовательно проходит состояния, соответствующие границам режимов: воспламенения (точка  $1_3$ ) – при наличии источника зажигания; самовоспламенения (точка  $1_С$ ); взрыва (точка  $1_В$ ). Такая смена режимов будет происходить и при других постоянных значениях давления по мере увеличения температуры системы.

Если процесс осуществляют при постоянной температуре, то в области относительно высоких давлений реакция при увеличении давления (от  $P_1$  до  $P_2$ ) также последовательно меняет режимы протекания от воспламенения до взрыва (от точки  $1_3$  до точки  $2_В$  на рис. 10). При этом давлению  $P_2 > P_1$  соответствует температура воспламенения  $2_3 < 1_3$ .

То, что повышение давления в реакционной системе приводит к возрастанию пожаровзрывоопасности учитывается посредством разграничения значений показателей пожаровзрывоопасности на полученные для открытого и закрытого тигля (сосуда) [31, 32]. Например, к легковоспламеняющимся относят жидкости с температурой вспышки не более 61 °С в закрытом тигле или 66 °С в открытом тигле [32]. Также известны случаи, когда забивка технологической сдувки приводила к повышению давления в системе и возникновению аварийной ситуации [34].

Последовательная смена режимов протекания неуправляемой химической экзотермической реакции по направлению к взрыву сопровождается ее самоускорением и возрастанием скорости тепловыделения во времени. Условно тип зависимости возрастания температуры реакционной системы при смене режимов протекания процесса показан на нижнем графике рис. 10. Такая зависимость не предполагает существования характерных точек, соответствующих границам режимов протекания реакции, что препятствует корректному определению границы перехода реакции в режим взрыва на основе анализа изменения температуры реакционной системы во времени.

Анализ рис. 10 позволяет сделать заключение, что по значению одного температурного показателя пожаровзрывоопасности не представляется возможным установить безопасные условия осуществления химико-технологического процесса с участием неуправляемой химической экзотермической реакции. Так, при консервативном подходе к определению безопасных условий эксплуатации ОЯТЦ следует учитывать максимальное значение давления, которое может возникнуть в технологической системе. Вместе с тем устанавливая в качестве ПБЭ не температуру перехода реакции в режим взрыва, а, например, температуру вспышки, можно создать определенный запас безопасности для компенсации возможного (в ограниченном диапазоне значений) повышения давления в системе.

#### **1.3.4. Влияние технологических параметров на условия возникновения цепного взрыва**

##### **1. Влияние температуры и давления.**

Влияние температуры и давления на условия возникновения цепного взрыва определяется их взаимосвязью на диаграмме трех пределов самовоспламенения (взрыва) (рис. 9).

Как следует из диаграммы трех пределов самовоспламенения (взрыва) при относительно высоких давлениях (атмосферном и выше) увеличение давления в реакционной системе приводит к снижению температуры, при которой произойдет цепной или тепловой взрыв.

##### **2. Влияние соотношения между реагентами.**

Изображенная на рис. 10 граница области перехода химической экзотермической реакции в режим взрыва соответствует лишь одному из возможных соотношений реагентов ( $\varphi = const$ ).

Характер изменения положения пределов взрыва (воспламенения, самовоспламенения), в зависимости от относительной концентрации кислорода и горючего (в общем виде – соотношения реагентов), приведен в [29].

В соответствии с [29] на правом верхнем графике рис. 11 схематично показано, что: как увеличение ( $\varphi_{в}$ ), так и уменьшение ( $\varphi_{н}$ ) относительного количества одного из реагентов (по сравнению со значением, близким к стехиометрическому ( $\varphi_{с}$ )) приводит к параллельному (в первом приближении) сдвигу границы перехода реакции в режим взрыва в сторону больших значений температуры.

Используя такой график, согласно [29], можно установить границу области перехода реакции в режим взрыва в координатах «давление – соотношение реагентов». На рис. 11 показаны такие графические построения.

В общем случае граница области перехода реакции в режим взрыва имеет вид, изображенный на левом верхнем графике рис. 11 штриховой линией. В частных случаях (как это видно из построений) такая область эволюционирует в две, которые отделены друг от друга, как это показано сплошными линиями на левом верхнем графике рис. 11.

Аналогичным образом можно определить границу перехода реакции в режим взрыва в координатах: температура – соотношение реагентов (нижний график на рис. 11).

Как следует из рис. 11, для постоянного значения давления существует собственное значение ВКПВ и НКПВ перехода реакции в режим взрыва (воспламенения, самовоспламенения). При этом в общем виде при низких значениях давления такие концентрационные пределы отсутствуют, с увеличением давления интервал между НКПВ и ВКПВ возрастает, затем уменьшается (или исчезает) и далее снова возрастает. Из рис. 11 также следует, что величина интервала между НКПВ и ВКПВ также зависит и от температуры.

Отсюда можно заключить, что определенные стандартными методами значения НКПВ и ВКПВ являются относительными, а не абсолютными значениями, и справедливы только для условий, близких к стандартным.

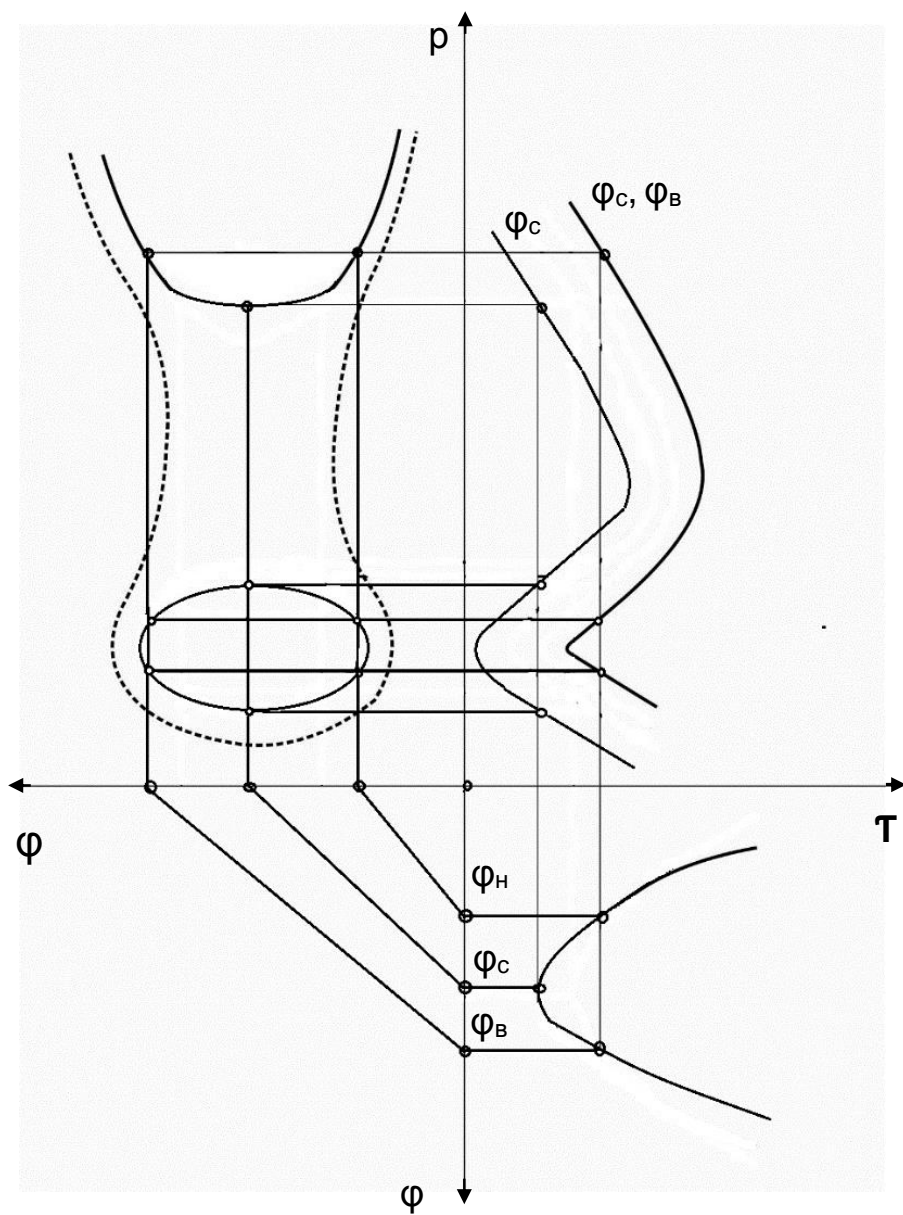


Рис. 11. Определение концентрационных пределов перехода реакции в режим взрыва



### 3. Масштаб процесса.

Другой характер эволюции зависимостей, относящихся к трем пределам взрыва (воспламенения, самовоспламенения), имеет место при изменении масштаба процесса. Так, в [29] отмечено, что с увеличением радиуса сосуда вершина полуострова самовозгорания опускается вниз в область меньших значений температуры и давления.

В соответствии с этим на рис. 12 условно показано возможное взаимное расположение границ взрыва для сосудов различных размеров.

Области взрыва для сосудов большего и меньшего размера обозначены на рис. 12, соответственно, как  $IV_1$  и  $IV_2$ .

Как следует из рис. 12, при проведении процесса при постоянном давлении значения границ областей перехода реакции в режим взрыва для сосудов с большим (точка 3) и меньшим (точка 2) диаметрами может существенно отличаться. При этом значение температуры, определенное для безопасных условий проведения процесса в малом масштабе (точка 1), может попасть в область взрыва для этого же процесса, но проводимого в аппарате с большим диаметром.

Если для процесса, проводимого при постоянном заданном давлении, температуры воспламенения (зажигания), самовоспламенения, взрыва обозначить символами  $T_3$ ,  $T_C$ ,  $T_B$ , а цифрами 1 и 2 обозначить сосуды с малым и большим диаметрами, то возможны следующие варианты взаимного расположения границ режимов протекания химической экзотермической реакции:

- 1)  $T_3(2) < T_C(2) < T_B(2) < T_3(1) < T_C(1) < T_B(1)$
- 2)  $T_3(2) < T_C(2) < T_3(1) < T_B(2) < T_C(1) < T_B(1)$
- 3)  $T_3(2) < T_3(1) < T_C(2) < T_B(2) < T_C(1) < T_B(1)$
- 4)  $T_3(2) < T_C(2) < T_3(1) < T_C(1) < T_B(2) < T_B(1)$
- 5)  $T_3(2) < T_3(1) < T_C(2) < T_C(1) < T_B(2) < T_B(1)$

Вариант 1) соответствует расположению зависимостей, изображенных на рис. 12. Варианты 2) и 4) соответствуют случаям, когда безопасное значение параметра (точка 1 на рис. 12), найденное для малого масштаба, попадает в область самовоспламенения для большого масштаба процесса. Варианты 3) и 5) соответствуют случаям, когда безопасное значение параметра, найденное для малого масштаба, попадает в область воспламенения от источника зажигания для большого масштаба процесса.

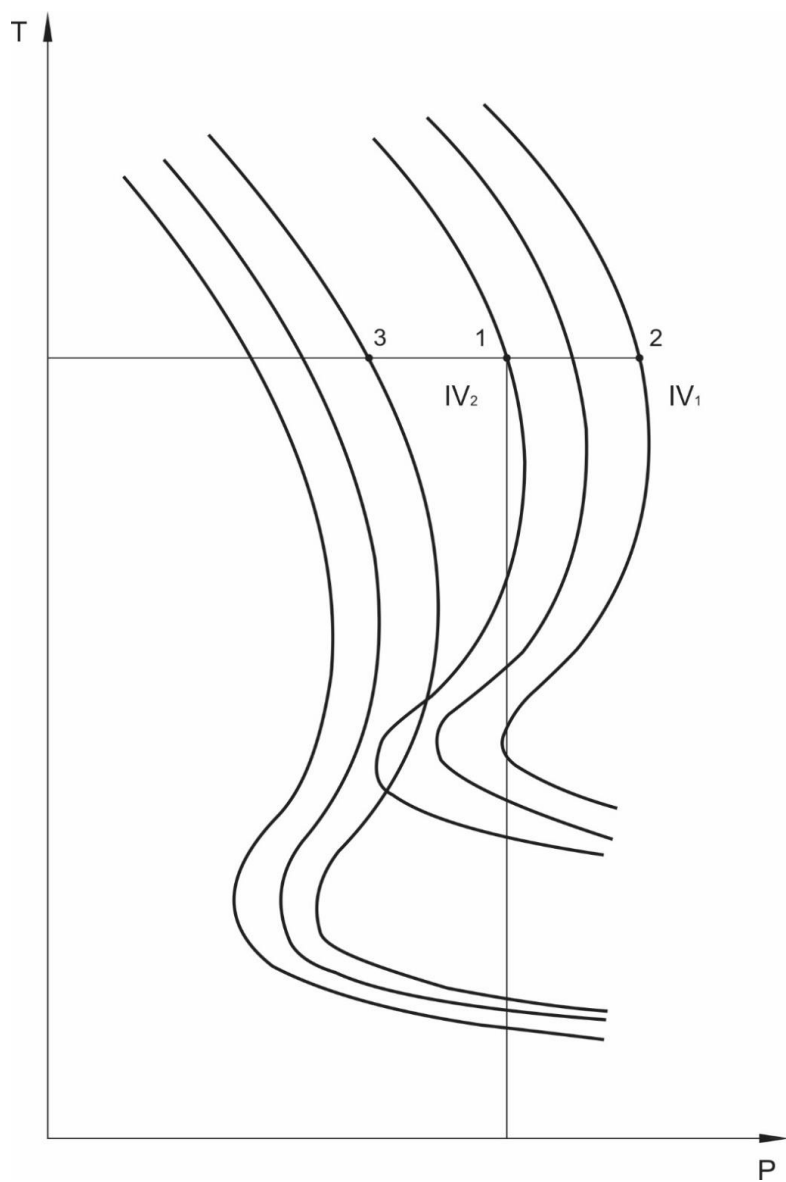


Рис. 12. Характер влияния размера сосуда на изменение режима протекания химической экзотермической реакции

При близких значениях  $T_3(1)$  и  $T_3(2)$ ,  $T_C(1)$  и  $T_C(2)$ ,  $T_B(1)$  и  $T_B(2)$  рекомендуемые на основании исследования модельной системы значения можно считать обоснованными для системы большего масштаба.

Отсюда также следует, что надежность рекомендуемого на основании результатов исследования модельной системы значения показателя пожаровзрывоопасности во многом определяется размерами интервалов между границами режимов протекания неуправляемой химической экзотермической реакции.

## 1.4. Основы теории детонации

### 1.4.1. Основные положения теории детонации

Основы теории детонации были заложены в трудах Чепмена, Жуге, Михельсона на рубеже XIX – XX веков и развиты в теории Зельдовича – Неймана – Деринга в 40-е годы XX века. Совокупность основных положений этой теории можно кратко сформулировать следующим образом:

– детонация возникает в реакционной химической системе в результате создания в ней высокоскоростной ударной волны с давлением, превышающим критическое значение;

– ударная волна с давлением, превышающим критическое значение, обеспечивает кратковременное сжатие слоя реакционной химической системы;

– в сжатом слое реакционной химической системы происходит адиабатический нагрев реагентов до температуры самовоспламенения смеси, и с высокой скоростью осуществляется химическая реакция;

– нагретые продукты химической реакции расширяются с постоянной скоростью (скоростью детонации), обеспечивая сжатие следующего слоя реакционной химической системы до давления, превышающего критическое значение, что приводит к распространению детонации по химической реакционной системе.

Согласно [35]:

1. *«Детонация представляет собой распространение реакции, которому предшествует сжатие газа ударной волной огромной амплитуды; давление в этой ударной волне достигает десятков атмосфер».*

2. *«Сжатие ударной волной происходит настолько быстро, что за время сжатия химический состав совершенно не успевает измениться».*

3. «Причиной, вызывающей химическую реакцию, является внезапный и энергичный нагрев смеси при сжатии ее ударной волной, которая является частью комплекса, называемого «детонационная волна».

«Если сравнивать детонацию с другими явлениями горения, то мы найдем больше сходства с самовоспламенением, нежели с распространением пламени: в детонационной волне в реакцию вступает исходная смесь, не разбавленная продуктами».

4. «В сжатом газе протекание химической реакции сопровождается расширением его и изменением давления».

«Протекание реакции сопровождается изменением состояния по своеобразному закону: реакция идет не при постоянном объеме или постоянном давлении, а при постоянной скорости распространения, что приводит к линейной связи давления и объема».

Выделение тепла сопровождается расширением, притом расширением настолько значительным, что давление падает. На протяжении большей части реакции выделение тепла сопровождается ростом температуры».

#### 1.4.2. Элементы математической модели детонации

В основе математической модели детонации лежит уравнение детонационной адиабаты, которое получило название уравнение Гюгонио.

Для исходных веществ, подвергающихся ударному сжатию, уравнение Гюгонио можно записать в виде [15]:

$$h_2 - h_1 = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (V_2 + V_1), \quad (17)$$

где  $h$  – энтальпия;  $P$  – давление;  $V$  – объем.

Индекс 1 относится к состоянию исходных веществ до сжатия, индекс 2 – после сжатия.

Для простейшего случая, когда химическая реакция сопровождается выделением количества тепла  $Q$ , а молекулярная масса и теплоемкость газа в ходе превращения практически не изменяется, уравнение Гюгонио для продуктов превращения будет иметь вид [15]:

$$\gamma/(\gamma - 1) (P_2 V_2 - P_1 V_1) - Q = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (V_2 + V_1), \quad (18)$$

При  $Q = 0$  уравнение Гюгонио для исходных веществ будет иметь вид:

$$\gamma/(\gamma - 1) (P_2 V_2 - P_1 V_1) = \frac{1}{2} (P_2 - P_1) (V_2 + V_1), \quad (19)$$

Уравнения (18), (19) отображаются гиперболами на  $P - V$  плоскости с горизонтальной и вертикальной асимптотами  $P_2 / P_1 = - (\gamma - 1)/(\gamma + 1)$  и  $V_2 / V_1 = (\gamma - 1)/(\gamma + 1)$ , причем гипербола для продуктов реакции располагается в  $P - V$  плоскости выше гиперболы для исходных веществ.

Переход от состояния сжатого ударной волной исходного вещества к состоянию продуктов, образующихся по химической реакции (от адиабаты Гюгонио для исходных веществ к адиабате Гюгонио для продуктов реакции), осуществляется в соответствии с уравнением, которое получило название прямой Михельсона [15]:

$$P = P_1 + [(V_1 - V) / V_1^2] D^2, \quad (20)$$

где  $D$  – постоянная скорость детонации для данного состава исходного вещества.

В результате ударного сжатия исходных веществ от состояния с параметрами  $P_1 V_1$  до состояния  $P_2 V_2$  их температура на границе зоны химической реакции повышается до:

$$T_n = (k D^2 + c_0^2)^2 / [k (k + 1)R], \quad (21)$$

где  $k$  – постоянная политропического закона  $PV^k = const$ ;

$c_0$  – скорость звука в исходном газе;

$R$  – универсальная газовая постоянная.

### 1.4.3. Диаграмма адиабаты Гюгонио

Основные положения теории детонации наглядно представляет диаграмма адиабаты Гюгонио, которая является зависимостью между давлением и объемом газа, относящаяся к его ударному сжатию.

*«Так как процесс сжатия газа в ударной волне скоротечен, то теплообменом газа с окружающей средой можно пренебречь и считать, что происходит адиабатное сжатие газа» [8].*

*«Закономерности сжатия в ударной волне принципиально отличаются от закономерностей адиабатного (изоэнтропического) сжатия газа в обычных газовых процессах. Последний математически описывается адиабатой Пуассона  $PV^k$ , где  $k$  – показатель Пуассона (адиабаты). Адиабатное сжатие обратимо, его можно выполнять ступенчато, последовательно сжимая газ от  $P_0$  до  $P_1 > P_0$ , затем до  $P_2 > P_1$  и далее, а также чередуя сжатие и разряжение; при этом достигается то же конечное состояние. Как и для всякого обратимого процесса, результат сжатия по адиабате Пуассона зависит не от порядка и пути ведения процесса, а лишь от параметров начального и конечного состояния газа.*

*Ударное сжатие необратимо, так как часть энергии сжатия расходуется на необратимое нагревание газа» [8].*

Вид зависимости между давлением и объемом газовой смеси, относящейся к адиабате Гюгонио, представлен на рис. 13, где цифрой 1 обозначена адиабата Гюгонио, относящаяся к исходной газовой смеси. Она носит название ударной адиабаты. Цифрой 2 на рис. 13 обозначена адиабата Гюгонио, относящаяся к продуктам химической реакции, возникающей после ударного сжатия. Она носит название детонационной адиабаты и расположена на диаграмме выше ударной адиабаты, что обусловлено наличием дополнительного источника энергии – экзотермического эффекта химической реакции.

При возникновении и поддержании детонации вещество слоя, сжимаемого ударной волной, изменяет свое состояние по адиабате Гюгонио от точки  $O$  до точки  $H$ , которую называют точкой Неймана. В точке  $H$  в результате достижения температуры самовоспламенения газовой смеси начинается химическая реакция, в результате которой состояние химической системы изменяется по прямой, связывающей точку  $H$  с точкой  $O$  исходного состояния газовой смеси. Эту прямую называют прямой Михельсона или прямой Рэлея. Она соответствует постоянной скорости детонации (ее минимально возможному значению). В точке  $\phi$  прямая Михельсона – Рэлея является касательной к адиабате Гюгонио для продуктов химической реакции. Точка  $\phi$  носит название верхней точки Чепмена – Жуге.

Расширяясь, продукты химической реакции сжимают новый слой газовой смеси от точки  $O$  до точки  $H$ , вызывая в нем химическую реакцию по траектории состояния системы от точки  $H$  до точки  $\phi$ , таким образом поддерживая продвижение детонационной волны по газовой смеси.

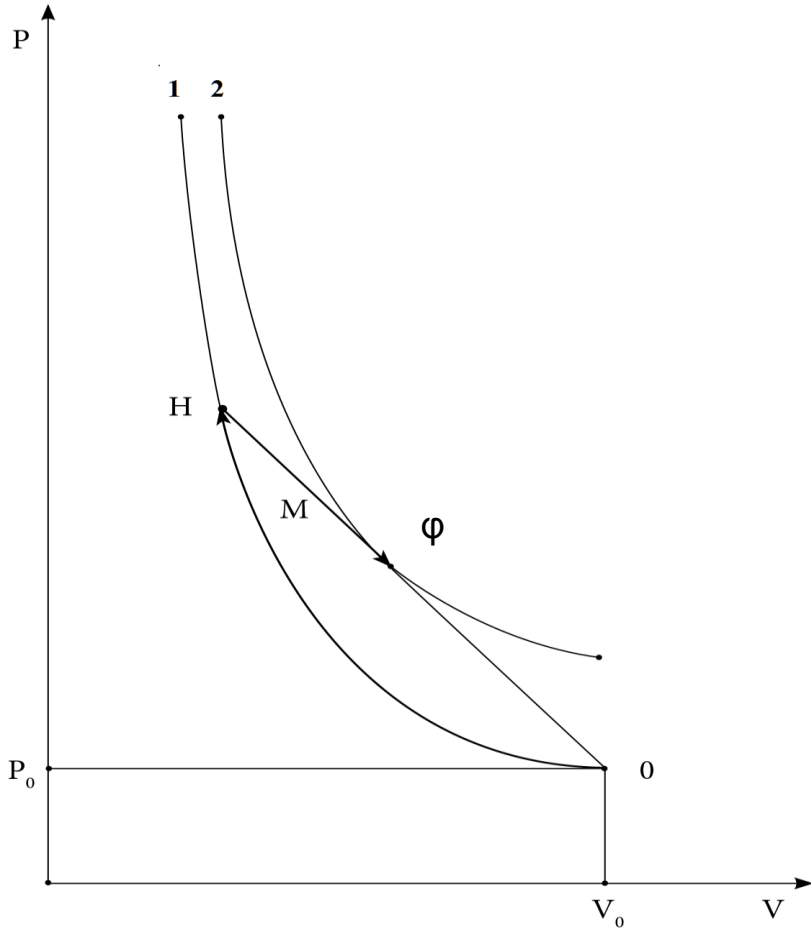


Рис. 13. Диаграмма взаимного расположения адиабат Гюгонно для реагентов (1) и продуктов реакции (2) для нормальной детонации

На рис. 14 показан примерный характер изменения концентрации продуктов давления и температуры в зоне реакции в детонационной волне согласно представлениям Я. Б. Зельдовича [35].

Во фронте детонационной волны создается максимальное давление, которое сжимает следующий слой газовой смеси. Температура во фронте детонационной волны скачкообразно увеличивается до температуры

самовоспламенения и далее растет за счет экзотермического эффекта по мере роста количества образующихся продуктов, а на границе зоны реакции и продуктов начинает снижаться из-за расширения образовавшихся продуктов реакции.

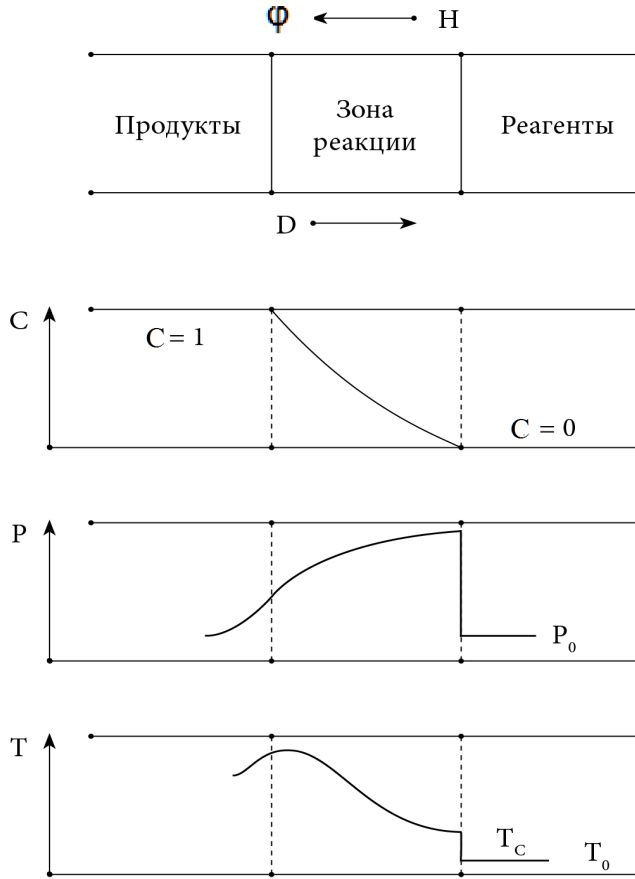


Рис. 14. Примерное распределение концентрации продуктов ( $C$ ), давления ( $P$ ), температуры ( $T$ ) в структуре одномерной детонационной волны

Соответствие между уменьшением давления и увеличением температуры при переходе от точки Н к точке  $\Phi$  в зоне реакции показано на рис. 15.



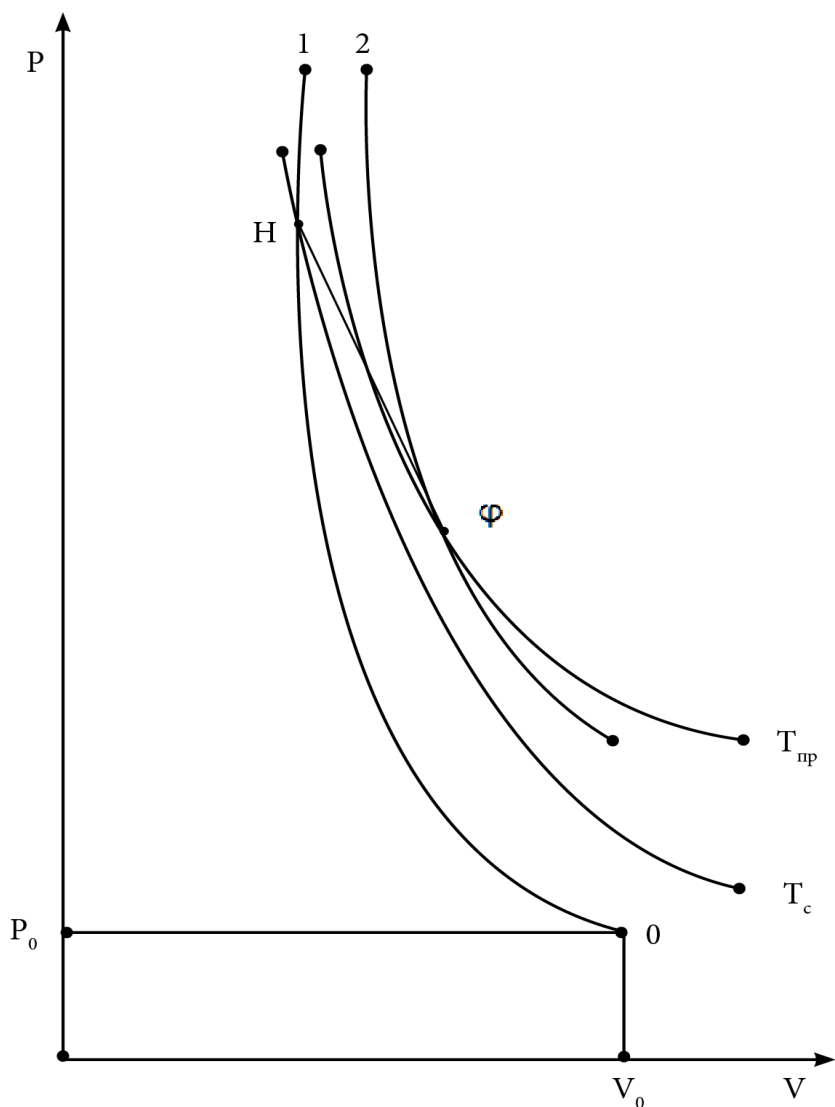


Рис. 15. Диаграмма взаимного расположения ударной адиабаты (1), детонационной адиабаты (2) и изотерм: температуры самовоспламенения ( $T_c$ ) и температуры продуктов ( $T_{пр}$ ) химической реакции

Как видно из рис. 15, точке  $\Phi$  с большим давлением соответствует температура самовоспламенения исходной газовой смеси, а точке  $\Phi$  с меньшим давлением соответствует более высокая температура продуктов реакции.

#### **1.4.4. Влияние технологических параметров на возникновение детонации.**

Условия возникновения ударных волн, приводящих к детонации, зависят от ряда технологических показателей.

### **1. Отношение диаметра к длине трубы, в которой находится реакционная химическая система**

В [36] сообщается следующее: *«Рассмотрим трубу с очень большим отношением длины к диаметру (например,  $L/D \sim 100$ ), заполненную горючей смесью, скорость горения которой сравнима со скоростью распространения звука в свежей смеси. В этом гипотетическом случае поджигание смеси у закрытого торца трубы способно привести к столь значительному ускорению пламени, что в трубе в конце концов сформируется детонационная волна».*

А вот что об этом приведено в [35]: *«Первоначально детонация газовых смесей была открыта при поджигании их зарядом взрывчатого вещества (гремучей ртути), в то время как поджигание тепловое – искрой или пламенем – вызывает медленное горение смеси (так называемую дефлаграцию...). Вскоре, однако, было показано, что при распространении пламени в достаточно длинных трубках пламя ускоряется, зачастую имеет место возникновение колебаний скорости движения пламени и, наконец, возникает детонационное горение смеси».*

### **2. Наличие инициатора детонации**

В [14] об этом приведена следующая информация.

*«1) взрывное разложение, вызываемое сильным ударом (капсюлем-детонатором), всегда представляет собой детонацию;*

*2) взрывное разложение, вызываемое нагреванием (пламенем), представляет собой горение в случае гремучей ртути и детонацию в случае азиды свинца.*

*В зависимости от характера взрыва, вызванного нагреванием, можно иницирующие взрывчатые вещества разделить на две категории:*

*1) взрывчатые вещества, ведущие себя как гремучая ртуть;*

2) взрывчатые вещества, ведущие себя как азид свинца».

«Между скоростью распространения горения и скоростью детонационной волны не имеется непрерывности: явление аналогично тому, которое возникает в газовых смесях. Детонационная волна возникает в уже горящей, в течение более или менее продолжительного времени, части вещества. Нормальная детонация происходит только в тот момент, когда фронт детонационной волны догоняет фронт пламени. Эти явления не наблюдаются в газовых смесях, где, наоборот, может случиться, что детонационная волна возникает в данной точке еще до момента прохождения через нее пламени. С другой стороны, как и в газовых смесях, одновременно с детонационной волной возникает ретонационная волна. Эта волна, идя в обратном направлении, заканчивает разложение частично сгоревшей гремучей ртути. Точка пересечения изображений этих двух волн позволяет точно определить то место, где возникает детонационная волна».

В [37] сообщается о следующих способах инициирования детонации конденсированных взрывчатых веществ.

«Детонация во взрывчатом веществе (ВВ) может быть инициирована подводом к нему различными способами».

«Независимо от того, каким образом дается первый импульс для начала процесса инициирования детонации ВВ (оно может дробиться, поджигаться, скоблиться или подвергаться удару), в нем формируется ударная волна. Инициирование детонации всегда проходит стадию, на которой ударная волна играет важную роль».

«Детонационную волну в ВВ можно инициировать, подвергая его воздействию достаточно сильной ударной волны. Существует минимальное давление за фронтом ударной волны, ниже которого в заряде ВВ данной плотности и формы детонация не распространяется».

Если в однородное жидкое или кристаллическое ВВ ввести газовые пузырьки или металлические опилки, образовав тем самым гетерогенное ВВ (с разрывами плотности), то минимальное давление ударной волны, необходимое для распространения детонации, можно уменьшить примерно на порядок. Результаты экспериментальных и теоретических исследований наводят на мысль, что ударное инициирование детонации в гомогенных ВВ происходит в результате простого теплового взрыва, вызванного ударным нагревом массы вещества. Полости или разрывы плотности в гетерогенном ВВ под воздействием ударной волны вызывают нерегулярности течения. Детонация в гетерогенном ВВ инициируется

локальными горячими пятнами, образующимися в нем в результате взаимодействия ударной волны с неоднородностями. Механизм горячих пятен играет важную роль также в процессе распространения и процессе разрушения детонационной волны».

«Глубокое понимание механизма инициирования детонации в ВВ необходимо для разработки более безопасных ВВ и для обеспечения безопасности при обращении с ВВ, используемыми в настоящее время».

Согласно [35]: «картина возникновения детонации сводится к следующему: горение вызывает движение газа перед фронтом пламени; торможение прилегающего к стенкам слоя газа приводит к перестройке профиля скорости; изменение профиля вызывает увеличение скорости горения, которое в свою очередь приводит к увеличению скорости движения газа; увеличенной скорости движения отвечает увеличенная скорость пламени и т. д. По мере ускорения пламени растет и амплитуда ударной волны; наконец температура сжатия достигает температуры самовоспламенения смеси... дальнейшее развитие явления после самовоспламенения приводит к распространению детонации».

«Для возникновения детонации необходимо, чтобы по достижении определенной амплитуды ударной волны произошло самовоспламенение смеси».

### 3. Концентрационные пределы возникновения детонации

В [34] приведены результаты экспериментов по определению детонационной способности ряда экстракционных и сорбционных систем, применяемых на ОЯТЦ, которые проводились в стальных неразрывающихся оболочках при инициировании детонатором и промежуточным зарядом ВВ.

Авторами [34] сообщается, что «смеси фосфорорганических экстрагентов и разбавителей не способны к детонации, если:

– содержание экстрагента в смеси менее 7 % масс. при любой концентрации  $\text{HNO}_3$ ;

– концентрация  $\text{HNO}_3$  (или суммарное содержание иона  $\text{NO}_3^-$ ) в водной фазе менее 12 моль/л при любом содержании экстрагента.

Смеси ТБФ с солью  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  стехиометрического состава в жестких условиях испытаний не детонируют.

Предельная концентрация  $\text{HNO}_3$ , при которой сорбционные смеси не детонируют, зависит от типа сорбентов. Для смесей с сорбентами ВП-1АП, ВП-3АП, АВ-23М в нитратной форме минимальная концентрация  $\text{HNO}_3$ , при которой смеси начинают детонировать, составляет примерно 2 моль/л. Катионит КУ-2 детонирует в смесях с  $\text{HNO}_3$  (концентрация

выше 10 моль/л), для СФ-5 детонации не было при концентрации  $\text{HNO}_3$  в водной фазе от 5 до 12 моль/л».

Авторами [34] сделаны выводы о том, что:

*«смеси экстрагента с азотнокислыми окислителями, которые используются или могут образовываться в технологических операциях экстракционного передела, не представляют опасности в отношении возникновения в них детонации»;*

*«условия инициирования детонации в сорбционных смесях такие же жесткие, как и в экстракционных, достижение их на производстве представляется невозможным, и технологические операции сорбционного передела следует считать безопасными в отношении возникновения детонации».*

#### **4. В [34] отмечено, что:**

*– «на детонационную способность сорбционных смесей сильнейшее влияние оказывает их консистенция, не в последнюю очередь определяемая способностью сорбентов набухать в  $\text{HNO}_3$ . Полусухие и влажные смеси детонируют, а очень влажные (с визуально наблюдаемым расслоением водной фазы относительно набухшего сорбента) не способны к детонации»;*

*«облучение влияет на детонационную способность сорбционных смесей так же, как оно влияет на набухаемость сорбентов в  $\text{HNO}_3$ ».*

#### **5. Согласно [35]:**

*«Скорость детонации заметно падала в шероховатых трубках по сравнению с гладкими».*

## Глава 2.

### Взрывоопасность объектов ядерного топливного цикла

#### 2.1. Объекты ядерного топливного цикла

##### 2.1.1. Понятие объекта ядерного топливного цикла

Согласно ФНП [38], ОЯТЦ являются:

– ЯУ – сооружения, комплексы, установки с ЯМ (за исключением промышленных реакторов, исследовательских ЯУ, критических или подкритических стенов, объектов добычи урановых руд), предназначенные для производства, транспортирования, переработки ядерного топлива и ЯМ (включая гидрометаллургическую переработку урановых руд в части получения оксидных концентратов природного урана, сублиматное производство, металлургическое производство, разделение изотопов урана, радиохимическую переработку ядерного топлива и ЯМ, конверсию оружейных материалов (урана и плутония), изготовление смешанного оксидного и других видов уран-плутониевого топлива, обращение с образующимися при этом РАО);

– радиационные источники – не относящиеся к ЯУ сооружения, комплексы и установки, в которых содержатся РВ и (или) РАО, расположенные на территории ЯУ и не предусмотренные в проекте ЯУ;

– ПХ ЯМ и РВ, хранилища РАО – не относящиеся к ЯУ и радиационным источникам стационарные объекты и сооружения, предназначенные для хранения ЯМ, РВ, РАО, включая объекты и сооружения, расположенные на территории ЯУ и не предусмотренные в проекте ЯУ;

– ПЗ РАО – стационарные объекты и сооружения, предназначенные для захоронения РАО (ПЗРО – пункты захоронения РАО, ППЗ ЖРО – полигоны глубинного захоронения жидких РАО).

Все перечисленные ОЯТЦ являются источниками ионизирующего излучения, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию в этом веществе ионов разного знака, и представляют собой радиационную опасность.

На ЯУ осуществляют технологические процессы с участием ЯМ (урана, плутония), РВ, технологических сред, которые могут представлять значительную пожаровзрывоопасность.

Радиационные источники используют в качестве генераторов ионизирующего излучения; для них риски возникновения взрыва минимальны.

При хранении ЯМ и РВ, хранении и захоронении РАО, вследствие протекания радиационно-химических превращений в технологических средах, могут создаваться пожаровзрывоопасные ситуации.

Возможность возникновения или внешнего воздействия взрыва необходимо предусматривать на всех этапах, связанных с деятельностью ОЯТЦ. В [38] приведены следующие этапы, относящиеся к деятельности ОЯТЦ:

- размещение;
- проектирование;
- сооружение (реконструкция);
- ввод в эксплуатацию;
- эксплуатация;
- вывод из эксплуатации.

Эксплуатация ОЯТЦ включает следующие режимы [38]:

- нормальная эксплуатация;
- эксплуатация с отклонениями;
- нарушения нормальной эксплуатации;
- предаварийная ситуация;
- авария;
- возвращение ОЯТЦ в контролируемое состояние.

Возникновение взрыва может привести соответственно к отклонениям и нарушениям нормальной эксплуатации, предаварийной ситуации и аварии на ОЯТЦ.

### ***2.1.2. Понятие систем объекта ядерного топливного цикла***

В деятельности по обеспечению ЯРБ ОЯТЦ рассматривают как совокупность систем, состоящих из соответствующих элементов. Таким образом, взрывопожароопасность ОЯТЦ определяется взрывопожароопасностью его систем и элементов.

В [38] дано следующее обобщенное определение системы, относящееся к рассмотрению ОЯТЦ.

*«Система – совокупность элементов, предназначенная для выполнения заданных функций».*

Так как понятия систем и элементов взаимосвязаны (элемент одной системы может вместе с тем являться системой для входящих в его состав элементов), то следует учитывать следующие особенности их взаимосвязи, принятые в системотехнике [40].

*«Система – организованное множество, образующее целостное единство.*

*Систему следует отличать от конгломерата, набора элементов.*

*Каждая система обладает следующими свойствами.*

*1. Система представляет собой целостный комплекс взаимосвязанных элементов.*

*2. Система учитывает единство окружающего мира и среды. (Этот тезис в [40] означает наличие взаимодействия системы с окружающей средой – прим. авт.).*

*3. Каждая исследуемая система представляет собой элемент системы более высокого порядка.*

*4. Элемент системы может рассматриваться как система более низкого порядка.*

*5. Необходимой принадлежностью целостной системы является наличие связей между элементами.*

*В каждой системе следует выделять ее структуру, для построения которой учитывается не все многообразие элементов и связей, а лишь наиболее важные, устойчивые. Если степень упрощения высока, то упрощение может перейти в свехупрощение. При таком подходе количество элементов и связей в системе будет бесконечно большим. Поэтому системный подход устанавливает, что в зависимости от поставленной перед исследователем задачи необходимо ограничиваться только основными элементами и связями, отбрасывая второстепенные, не нужные для цели исследования».*

С учетом приведенных особенностей можно рассмотреть отличительные признаки систем, входящих в состав ОЯТЦ.

В [38] приведена следующая классификация систем ОЯТЦ.

Системы и элементы ОЯТЦОЯТЦ различаются по:

- назначению;
- влиянию на безопасность;
- характеру выполняемых ими функций безопасности.

Системы и элементы ОЯТЦ по назначению разделяются на:

- системы и элементы нормальной эксплуатации;
- системы и элементы безопасности.

Системы и элементы ОЯТЦ по влиянию на безопасность разделяются на:

- важные для безопасности;
- не влияющие на безопасность.

Системы и элементы безопасности ОЯТЦ различаются по характеру выполняемых ими функций безопасности и подразделяются на:

- защитные;



- локализирующие;
- обеспечивающие;
- управляющие.

Определения входящих в классификацию систем ОЯТЦ приведены в [38].

Схема данной классификации систем ОЯТЦ приведена на рис. 16.

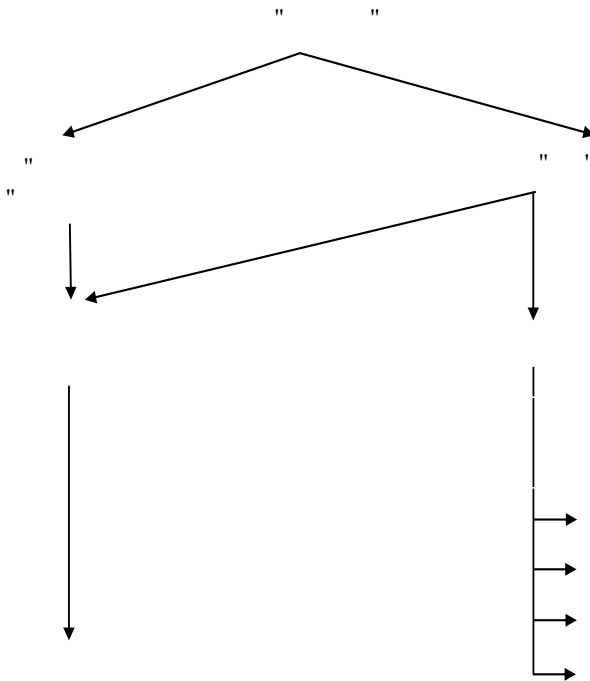


Рис. 16. Схема классификации систем объектов ядерного топливного цикла

Кроме представленных систем в нормативных документах, относящихся к ЯРБ ОИАЭ, приведены разновидности систем (активная, пассивная, независимая, вспомогательная, многобарьерная, герметизации, захоронения).

Таким образом, можно отметить, что пожаровзрывоопасность ОЯТЦ обусловлена пожаровзрывоопасностью систем нормальной эксплуатации, а системы безопасности ОЯТЦ могут выполнять и функции обеспечения взрывобезопасности.

### 2.1.3. Понятие элементов систем ядерного топливного цикла

В отличие от определения системы ОЯТЦ, определение элементов ОЯТЦ, приведенное в [38], отличается конкретностью.

*«Элементы – оборудование, аппараты, приборы, трубопроводы, кабели, строительные конструкции и другие изделия, обеспечивающие выполнение заданных функций самостоятельно или в составе систем и рассматриваемые в проекте в качестве структурных единиц при выполнении анализов надежности и безопасности».*

Отсюда следует, что именно элементы ОЯТЦ должны служить в качестве структурных единиц при анализе взрывопожароопасности ОЯТЦ.

С учетом приведенных выше особенностей понятия системы, можно отметить, что в определении элемента, приведенного в [38], дан примерный перечень именно основных элементов, которые могут служить структурными единицами при анализе ЯРБ ОЯТЦ. Вместе с тем следует иметь в виду, что такие структурные единицы могут рассматриваться и в качестве систем при детальном анализе взрывоопасности ОЯТЦ, то есть они могут не совпадать со структурными единицами, выделяемыми при выполнении анализа взрывоопасности.

На практике структурными единицами при оценке взрывопожароопасности ОЯТЦ обычно служат технологическое оборудование, включая аппараты (реакторы) (или их элементы), и технологическая среда, которые используются при осуществлении технологической операции (или ее элементов).

В [38] приведена классификация элементов ОЯТЦ. По влиянию элементов ОЯТЦ на безопасность (следовательно, и по представляющей опасности) устанавливается четыре класса безопасности.

К классу безопасности 1 относятся элементы, отказы которых могут являться исходными событиями запроектных аварий, приводящими к облучению работников (персонала) и (или) населения, выбросу (сбросу) РВ в окружающую среду свыше установленных для проектных аварий пределов.

К классу безопасности 2 относятся элементы, отказы которых могут являться исходными событиями, приводящими к проектным авариям.

К классу безопасности 3 относятся элементы:

- систем, важных для безопасности, не отнесенных к классам 1 и 2;
- содержащие радиоактивные и (или) токсичные вещества, поступление которых в помещение и (или) окружающую среду при отказах может превысить уровни, установленные в соответствии с нормативными документами;
- выполняющие функции контроля обеспечения радиационной защиты работников (персонала) и населения.

К классу безопасности 4 относятся элементы нормальной эксплуатации ЯТЦ, не влияющие на безопасность и не отнесенные к классам безопасности 1, 2 или 3.

В соответствии с этой классификацией взрывоопасным элементам соответствуют 1, 2 и 3 классы безопасности.

Применительно к ядерной безопасности в [38] приведены следующие типы оборудования, используемого на ОЯТЦ:

- оборудование безопасное (оборудование типа «Б») – оборудование, конструкция, геометрические особенности и конструкционные материалы которого исключают возможность возникновения самоподдерживающейся цепной реакции в условиях нормальной эксплуатации и при любых учитываемых в проекте ОЯТЦ исходных событиях;

- оборудование опасное (оборудование типа «О») – оборудование, которое не удовлетворяет требованиям определения «Оборудование безопасное (оборудование типа «Б»)»;

- оборудование с повышенным коэффициентом запаса (оборудование типа «ПКЗ») – опасное оборудование, особенности конструкции которого при работе с данными ядерными делящимися материалами таковы, что величина минимальной критической массы для этого оборудования превышает не менее чем в пять раз величину минимальной критической массы для того же ядерного делящегося материала, но в системе, имеющей форму сферы с полным отражателем, и для которого установлены повышенные коэффициенты запаса.

Ниже приведены определения терминов, которые могут быть использованы при анализе взрывобезопасности элементов ОЯТЦ.

*«Технологические сдувки – удаляемые из технологического оборудования парогазовые смеси, вещества в газообразном и (или) аэрозольном виде» [38].*

*«Физические барьеры – преграда на пути распространения ионизирующего излучения, ядерного материала, радиоактивного вещества» [38].*

*«Горячая камера» – бокс для работы с сильно радиоактивными веществами (облученные тепловыделяющие элементы, образцы материалов и конструкционные элементы активной зоны и т. д.)» [41].*

*«Горячая камера – изготовленная с применением экранирующих материалов герметичная камера, оборудованная дистанционным инструментом, управляемым извне, с помощью которого в ней выполняют операции с радиоактивными материалами и изделиями» [42].*

*«Герметичное помещение – пространство вокруг систем (элементов), оборудования ОЯТЦ, закрытое совокупностью элементов конструкций, образующих предусмотренную проектом границу, препятствующую распространению ядерных материалов и (или) радиоактивных веществ за пределы границ в количестве, превышающем пределы, установленные в проекте для нормальной эксплуатации и проектных аварий» [38].*

*«Каньоном называли ... помещение для аппаратов, отделенное от основных помещений защитным покрытием и обычно располагавшееся ниже основного производства» [43].*

## **2.2. Характеристика взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла**

### **2.2.1. Понятие взрывоопасности ядерного топливного цикла**

Взрывоопасность является одним из основных видов опасностей, сопровождающих деятельность ОЯТЦ. Вместе с тем специфика деятельности ОЯТЦ определяет и специфику их взрывоопасности.

В нормативных документах по ЯРБ отсутствует определение взрывоопасности ОИАЭ и, в частности, ОЯТЦ.

Тем не менее понятие о взрывоопасности ОИАЭ и ОЯТЦ можно составить из анализа определения противоположного по смыслу термина, приведенного в [39]:

*«взрывобезопасность (водородная) – состояние производственного процесса на АС, при котором исключается возможность взрыва, или в случае его возникновения предотвращается воздействие на работников (персонал) и население, а также ослабляется воздействие на системы*

и элементы АС опасных и вредных факторов взрыва водородсодержащих смесей».

Это частное определение можно распространить и применительно к общему случаю взрывобезопасности ОИАЭ и ОЯТЦ.

Трансформируя рассматриваемое определение в направлении от безопасности к опасности, можно заключить, что под взрывоопасностью ОЯТЦ следует понимать состояние производственного процесса на ОЯТЦ, при котором не исключается возможность взрыва с воздействием на работников (персонал) и население, на системы и элементы ОЯТЦ опасных и вредных факторов взрыва.

Однако такая формулировка взрывоопасности ОЯТЦ в недостаточной степени характеризует ее специфику, а именно опасность радиационного воздействия взрыва на персонал, население и окружающую среду, которая может существенно превышать опасность по сравнению со взрывом без радиационного воздействия, в том числе и в случае его возникновения непосредственно на ОЯТЦ. Очевидно, что взрыв на ОЯТЦ баллона со сжатым инертным газом и взрыв на ОЯТЦ емкости с высокоактивными отходами не сопоставимы по масштабу производимого ущерба.

Кроме того, в анализируемом определении в термин «*состояние производственного процесса*» фактически вкладывается смысл совокупности состояний объекта, изменяющихся в ходе протекания производственного процесса. Действительно, ОЯТЦ представляет собой совокупность систем, характеризующихся определенным набором состояний, каждое из которых представляет собой определенную совокупность значений количественных показателей и качественных характеристик. Последовательная смена таких состояний представляет собой процесс.

Сам ОЯТЦ можно также рассматривать в качестве системы, обладающей интегральной совокупностью состояний его систем и элементов.

Спецификой ОЯТЦ является также то, что в них происходит непрерывное изменение состояний систем вследствие непрерывного протекания радиоактивных превращений, как при осуществлении технологических операций, так и при хранении продукции и отходов.

Поэтому, с точки зрения взрывоопасности ОЯТЦ, в общем случае весь диапазон возможных состояний ОЯТЦ можно разделить на две части: для одной совокупности изменяющихся состояний возникновение взрыва

практически невозможно, для другой – возможно. Способность (свойство) ОЯТЦ переходить из первой совокупности состояний во вторую и определяет его взрывоопасность.

С учетом этого взрывоопасность ОЯТЦ можно сформулировать как способность переходить в состояния, при которых не исключается возможность взрыва с радиационным воздействием и (или) другими возможными воздействиями опасных и вредных факторов взрыва на работников (персонал), население, окружающую среду, системы и элементы ОЯТЦ.

Разновидностью взрывоопасности является взрывопожароопасность. Согласно ФЗ [1]: *«взрывопожароопасность объекта защиты – состояние объекта защиты, характеризующее возможность возникновения взрыва и развития пожара или возникновения пожара и последующего взрыва».*

Отсюда следует, что взрывоопасность может реализоваться разными способами: посредством взрыва без возникновения пожара, посредством взрыва с последующим пожаром, посредством перехода от режима горения (пожара) к режиму взрыва.

Обобщая эти случаи, можно привести следующее определение: взрывопожароопасность ОЯТЦ – это способность объекта переходить в состояния, при которых не исключается возможность взрыва и (или) взрыва и развития пожара, и (или) возникновения пожара и последующего взрыва – с радиационным воздействием и (или) другими возможными воздействиями опасных и вредных факторов взрыва, и (или) пожара на работников (персонал), население, окружающую среду, системы и элементы ОЯТЦ.

Таким образом, пожарная опасность может являться составной частью при рассмотрении взрывоопасности и наоборот. Это положение зафиксировано и в определениях пожарной опасности.

Отличительные признаки пожарной опасности приведены в [1]: *«пожарная опасность объекта защиты – состояние объекта защиты, характеризующее возможность возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара»; «пожарная опасность веществ и материалов – состояние веществ и материалов, характеризующее возможность возникновения горения или взрыва веществ и материалов».*

На рис. 17 представлена взаимосвязь терминов, относящихся к понятию взрывоопасности объекта защиты.

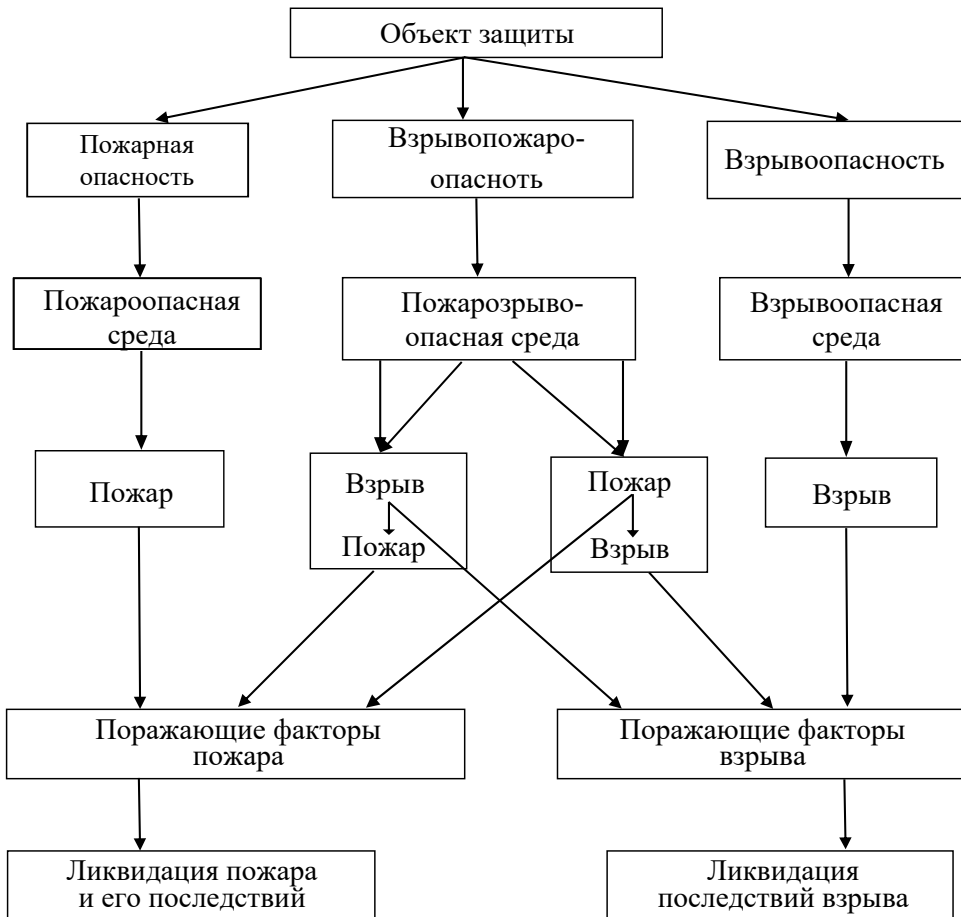


Рис. 17. Взаимосвязь терминов, относящихся к взрывоопасности объекта защиты

В общем случае взрыв на ОЯТЦ представляет собой комплексную опасность: он способен привести к выходу ионизирующего излучения и может сопровождаться пожаром и выходом химически опасных веществ. Схема составных частей этой комплексной опасности показана на рис. 18. Инициирование взрывом других видов опасности показано на рис. 18 штриховыми линиями.

Поскольку состояния ОЯТЦ, при которых не исключается возможность возникновения взрыва, разнообразны, его взрывоопасность представляет собой комплексную проблему.

Взрывопожароопасность ОЯТЦ включает рассмотрение взрывопожароопасности:

– как отдельных технологических систем, так и элементов ОЯТЦ и их совокупности;

– на различных этапах эксплуатации ОЯТЦ;

– для различных режимов эксплуатации ОЯТЦ;

– с учетом различных последствий воздействия взрыва;

– с учетом различных режимов взрывчатых превращений.

Взрывопожароопасность ОЯТЦ определяется взрывопожароопасностью систем его нормальной эксплуатации, его продукции, отходов производства.

В свою очередь, взрывопожароопасность системы нормальной эксплуатации ОЯТЦ определяется взрывопожароопасностью ее элементов.

Под взрывопожароопасным элементом ОЯТЦ следует понимать элемент, в котором локализованы потенциально взрывопожароопасные: технологическая среда или продукция, или отходы производства ОЯТЦ.

Взрывы были зафиксированы в следующих взрывопожароопасных элементах зарубежных объектов [44]: реакционный сосуд, перчаточный бокс, технологический аппарат, емкость для хранения РАО, сорбционная колонна, контейнер, пруд-отстойник, канализационный коллектор, испаритель, реактор.



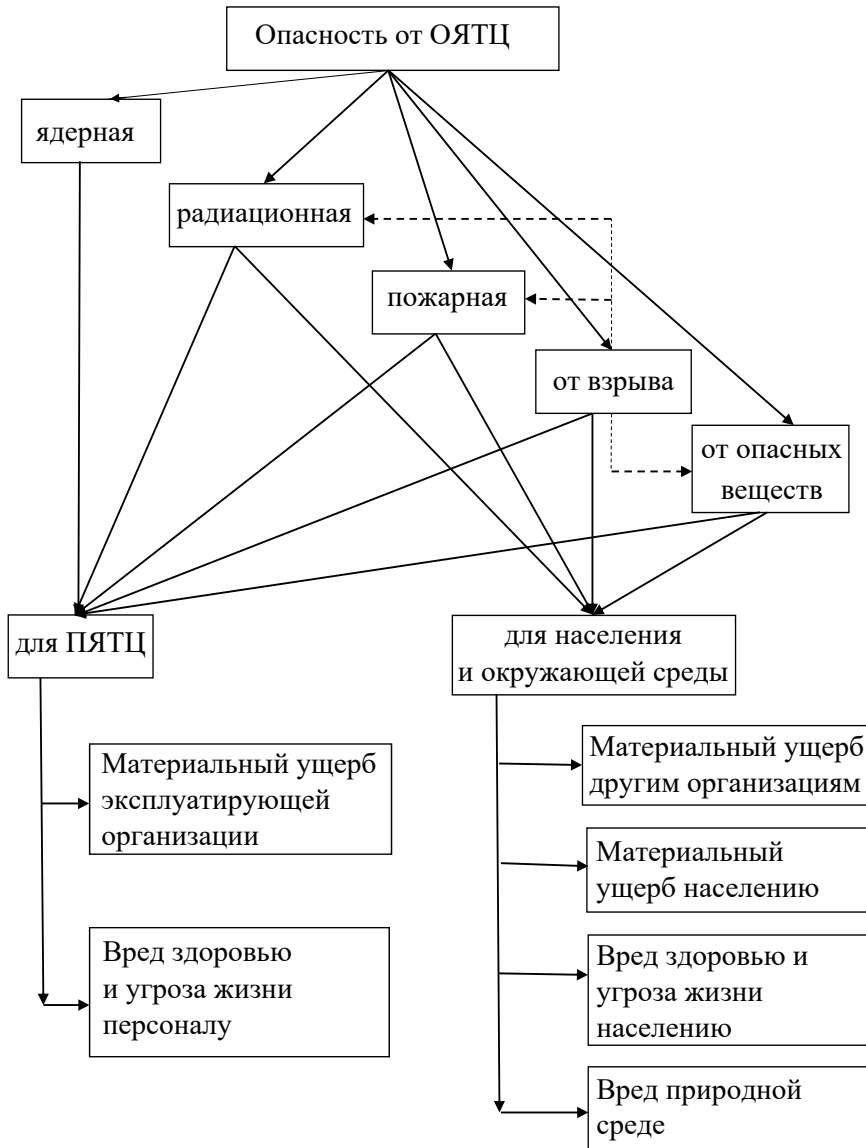


Рис. 18. Схема составных частей комплексной опасности, возникающей в результате взрыва на объекте ядерного топливного цикла

К видам деятельности ОЯТЦ, которые могут представлять взрывопожароопасность, относятся [44]:

- добыча и переработка урановой руды;
- аффинаж урана и его конверсия в гексафторид;
- обогащение урана и его конверсия;
- изготовление топлива;
- использование топлива на АС;
- хранение отработавшего топлива;
- переработка отработавшего топлива;
- транспортирование ЯМ;
- вывод из эксплуатации ядерных объектов;
- обращение с РАО и варианты его захоронения (включая отработавшее ядерное топливо).

### ***2.2.2. Понятие потенциальной взрывоопасности***

Потенциальная взрывопожароопасность ОЯТЦ – одна из наиболее значимых составных частей его потенциальной опасности.

В ст. 24 ФЗ [45] приведено следующее положение: меры, реализуемые органами государственного регулирования безопасности, по выполнению возложенных на них полномочий должны быть соразмерны потенциальной опасности ОИАЭ и деятельности в области использования атомной энергии. Отсюда следует, что и меры по предотвращению взрывопожароопасности ОЯТЦ должны быть соразмерны потенциальной опасности возникновения и последствий взрывов на ОЯТЦ.

В п. 6.7.7.2 ФНП [38] указано, что в проекте ОЯТЦ должен быть представлен перечень потенциально взрывоопасных веществ и смесей, горючих сред, окислителей, используемых и образующихся при проведении технологических процессов.

В соответствии с этим требованием можно считать, что технологические процессы, в которых используются или образуются потенциально взрывоопасные вещества и смеси, горючие среды, окислители являются потенциально взрывоопасными.

В [46] рассмотрена классификация угроз, которые делят на активные, потенциальные, комплексные и ничтожные.

Согласно этой классификации:

– «активная угроза, которую представляет объект для среды, характеризуется реальным воздействием объекта на окружающую среду;

– потенциальные (виртуальные, пассивные) угрозы (опасности) представляют объекты, воздействие которых на окружающую среду меньше допустимого и при эксплуатации, и при ее прекращении. Их вредное воздействие возникает только при серьезных нарушениях эксплуатации, при авариях, возникающих случайно вследствие самых разных факторов.

Активные угрозы существуют всегда, они достоверны, детерминированы, но их воздействие на конкретную точку в пространстве зависит от их интенсивности, расстояния от объекта до данной точки и ослабляющих свойств окружающей среды.

Пассивные угрозы также существуют всегда, но их воздействие определяется вероятностью аварии, то есть вероятностью превращения пассивной угрозы в активную, а затем упомянутыми выше показателями активной угрозы.

Комплексная угроза состоит как из активной постоянной составляющей, так и из потенциальной компоненты.

В этом смысле ничтожные угрозы может быть и существуют всегда, но воздействие их пренебрежимо мало или вероятность их воздействия равна нулю».

Таким образом, можно заключить, что основным критерием потенциальной взрывопожароопасности ОЯТЦ является вероятностный показатель.

В [47] применительно к ОЯТЦ приводятся следующие категории вероятности – маловероятные и практически невероятные:

– практически невероятные – вероятность приблизительно  $10^{-5}$ /год или менее;

– маловероятные – вероятность приблизительно от  $10^{-2}$  до  $10^{-5}$ /год.

Согласно [38] «следует стремиться к тому, чтобы вероятность запроектных аварий на объекте ЯТЦ, приводящих к превышению уровней, установленных нормами радиационной безопасности для принятия неотложных решений по обязательной эвакуации населения, не превышала  $10^{-6}$  в год».

Категории вероятности могут применяться как при оценке вероятности возникновения взрыва на ОЯТЦ, так и при оценке вероятности разрушения в результате взрыва на ОЯТЦ защитных барьеров

и вероятности радиационного загрязнения в результате взрыва территории окружающей среды.

Для оценки риска взрывов используют различные методы вероятностного анализа безопасности, включая анализ «дерева отказов» и анализ дерева «событий» [48]. При анализе «дерева отказов» выявляются комбинации отказов оборудования, ошибок персонала, воздействия внешних факторов, которые приводят к аварийной ситуации. При анализе «дерева событий» определяют возможные конечные состояния объекта, каждое из которых является реализацией определенных сочетаний промежуточных событий, вытекающих из исходного события и формирующих траекторию развития аварии.

В [16] отмечено, что для возникновения воспламенения или взрыва при проведении технологических процессов необходимо наличие минимум двух факторов, каждый из которых отдельно не является исходным событием.

К таким факторам, действующим одновременно, относят:

- наличие пожаровзрывоопасных веществ;
- наличие источника зажигания (инициирования взрыва);
- отказ элемента технологической системы;
- ошибка работника (персонала);
- ошибочное решение;
- внешний фактор.

Потенциальная взрывопожароопасность ОЯТЦ определяется потенциальной пожароопасностью технологических процессов и технологических сред ОЯТЦ.

В качестве «объектов» (согласно [38]: элементов систем ОЯТЦ), содержащих потенциальные источники аварий, в [16] рекомендуется рассматривать:

- промышленные аппараты (растворители, экстракторы, сорбционные колонны, емкости для хранения отходов, выпарные аппараты, денитраторы, фильтры и др.);
- системы вентиляции (общая, локальная), трубопроводы, газоходы;
- защитные камеры, боксы, рабочие помещения и каньоны, в которых находятся аппараты.

К потенциальной опасности при проведении технологических процессов на радиохимических предприятиях (РХП) в [16] относят:

- выделение водорода;

- интенсивное газовыделение при наличии органических веществ в регенерированной азотной кислоте;
- интенсивное газовыделение при окислении флокулянтов азотной кислотой;
- осушение содержимого фильтра и нагрев до температуры взрыва за счет тепла радиоактивного распада;
- образование горючей смеси паров экстрагента с воздухом;
- создание избыточного давления в закрытом аппарате (или при недостаточной пропускной способности сдувок открытого аппарата) за счет окислительных процессов в смеси экстрагента и/(или) восстановителя (гидразина) с азотной кислотой;
- достижение температуры взрыва в смеси экстрагента с азотной кислотой;
- содержание в упариваемом растворе экстрагента (или продуктов его превращения) сверх пределов растворимости в виде отдельной фазы;
- образование и накопление горючей газовой смеси в сдувочных коллекторах;
- осушение органического сорбента в нитратной форме или из азотнокислого раствора и нагревание его до температуры взрыва;
- образование способной к воспламенению газовой смеси с монооксидом углерода при недостаточном окислении восстановителей азотнокислыми окислителями;
- наличие в плаве экстрагента или продуктов его превращения в виде отдельной фазы;
- образование азотистоводородной кислоты и взрывоопасных азидов.

В [16] сообщается, что технологические процессы радиохимических предприятий ЯТЦ являются потенциально пожаровзрывоопасными в случаях если при их проведении:

- образуются или используются горючие газы (водород, аммиак, метан, оксид углерода и др.);
- используются горючие жидкости (экстрагенты, углеводородные разбавители и другие органические жидкости);
- используются смеси восстановителей с азотнокислыми окислителями (смеси экстрагентов и органических сорбентов с азотной кислотой и нитратами, азотнокислые растворы, содержащие органические продукты и др.).

В перечень потенциально пожаровзрывоопасных технологических процессов радиохимических производств в [16] включены следующие операции:

- растворение отработавшего ядерного топлива;
- осветление растворов (фильтрация);
- отделение урана и плутония от других актинидов и продуктов деления методом жидкостной экстракции;
- получение плава уранилнитрата;
- аффинаж плутония;
- сорбционное извлечение продуктов деления;
- хранение высокоактивных жидких растворов, перлитных суспензий, отработавшего экстрагента;
- упаривание растворов средней активности и высокоактивных растворов;
- остекловывание высокоактивных отходов;
- денитрация плава уранилнитрата;
- приготовление раствора гидразингидрата;
- упаривание азотнокислых растворов, содержащих восстановители;
- электрохимическое и каталитическое восстановление урана;
- использование гидразина в качестве восстановителя.

### ***2.2.3. Понятие взрывоопасности технологической среды***

Непосредственно взрывоопасность ОЯТЦ определяется взрывоопасностью находящихся в элементах его систем технологических сред, веществ и материалов.

В нормативных документах установлены различные категории взрывоопасных технологических сред, веществ и материалов. Для более полного их понятия в табл. № 7 приведены используемые в нормативных документах определения основных терминов, входящих в состав формулировок рассмотренных ниже разновидностей взрывоопасных технологических сред, веществ и материалов.

Таблица № 7

**Определения технологических сред и пожаровзрывоопасных веществ**

№ п/п	Определение	Источник
1	«Технологическая среда – вещества и материалы, обращающиеся в технологической аппаратуре (технологической системе)»	[1]
2	«Технологическая среда – сырьевые материалы. Реакционная масса, полупродукты, находящиеся и перемещающиеся в технологической аппаратуре (технологической системе)»	[2]
3	«Технологические сдувки – удаляемые из технологического оборудования парогазовые смеси, вещества в газообразном и (или) аэрозольном виде»	[38]
4	«Взрывоопасное вещество – вещество, которое может взрываться при воздействии пламени или проявлять чувствительность к сотрясениям или трениям большую, чем динитробензол»	[49]
5	«Взрывоопасные вещества – вещества (материалы), способные образовывать самостоятельно или в смеси с окислителем взрывоопасную среду»	[2]
6	«Взрывоопасная смесь – смесь воздуха или окислителя с горючими газами, парами легко воспламеняющихся жидкостей, горючими пылями или волокнами, которая при определенной концентрации и возникновении источника инициирования взрыва способна взорваться»	[1]
7	«Взрывчатые вещества – вещества, которые при определенных видах внешнего воздействия способны на очень быстрое самораспространяющееся химическое превращение с выделением тепла и образованием газов»	[50]
8	«Горючие вещества – жидкости, газы, пыли, способные самовозгораться от источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления»	[49]
9	«Окислители – вещества и материалы, обладающие способностью вступать в реакцию с горючими»	[1]

№ п/п	Определение	Источник
	<i>веществами, вызывая их горение, а также увеличивать его интенсивность»</i>	
10	<i>«Пирофорные вещества – вещества, включая смеси и растворы (жидкие или твердые), которые даже в малых количествах воспламеняются при контакте с воздухом в течение 5 мин. Данные вещества наиболее подвержены самовозгоранию»</i>	[51]

Согласно классификации технологических сред по пожаровзрывоопасности и пожарной опасности [1]:

– *«среда относится к пожаровзрывоопасным, если возможно образование смесей окислителя с горючими газами, парами легковоспламеняющихся жидкостей, горючими аэрозолями и горючими пылями, в которых при появлении источника зажигания возможно инициирование взрыва и (или) пожара;*

– *среда относится к взрывоопасным, если возможно образование смесей воздуха с горючими газами, парами легковоспламеняющихся жидкостей, горючими жидкостями, горючими аэрозолями и горючими пылями или волокнами и, если при определенной концентрации горючего и появлении источника инициирования взрыва (источника зажигания) она способна взрываться».*

Как следует из приведенных определений, установленное в [1] различие между пожаровзрывоопасными и взрывоопасными средами не характеризуется четким критерием и сводится в основном к отдельному рассмотрению возникновения взрыва на воздухе, в отличие от возникновения взрыва в среде любых других окислителей.

Кроме того, в состав взрывоопасных сред дополнительно введены в качестве горючего компонента горючие жидкости и горючие волокна, а в качестве дополнительного условия возникновения взрыва на воздухе указано на необходимость достижения определенной концентрации горючего.

При этом не представляется возможным исключить вероятность возникновения пожара в результате взрыва взрывоопасной среды на воздухе. Тем более, что к взрывопожароопасным в [2] относят паро-, газо- и пылевоздушные смеси.



Таким образом, в общем случае приведенное деление технологических сред на пожаровзрывоопасные и взрывоопасные является при рассмотрении только состава реагирующих веществ достаточно условным, но приобретает свое значение, если учитываются пожароопасные характеристики продуктов взрыва.

В любом случае перечисленные технологические среды следует относить к взрывоопасным.

Взрывоопасность технологической среды, в свою очередь, определяется наличием в ней взрывоопасных веществ и материалов.

Совместное использование терминов «материал» и «вещество» в приведенных формулировках указывает на их определенное сходство. Под материалом можно понимать физическое тело, обладающее определенными потребительскими свойствами, а под веществом то, из чего физическое тело состоит.

Обычно материалами называют твердые тела. Материал может быть природный и искусственный. Из материалов изготавливают изделия.

В [1] приведено следующее определение, относящееся к понятию взрывоопасности веществ и материалов: *«пожаровзрывоопасность веществ и материалов – способность веществ и материалов к образованию горючей (пожароопасной или взрывоопасной) среды, характеризующая их физико-химическими свойствами и (или) поведением в условиях пожара»,* где *«горючая среда – среда, способная воспламениться при воздействии источника зажигания».*

В данном определении зафиксированы два аспекта возникновения взрыва: в результате образования взрывоопасной среды и в условиях возникшего пожара. В первом случае во внимание принимается в основном соотношение реагентов, необходимое для перехода режима горения в режим взрыва, во втором случае к основному источнику возникновения взрыва относят высокую температуру, достигаемую при пожаре, достаточную для достижения области взрываемости при данном соотношении реагирующих веществ.

Различное употребление последовательности расположения терминов «пожар» и «взрыв» в приведенных выше словосочетаниях в достаточной степени условно, хотя при этом может быть выделен приоритет одного из видов опасности:

– пожаровзрывоопасность веществ и материалов обусловлена преимущественно опасностью возникновения пожара, который в особых

случаях способен инициировать взрыв, если вовремя потушить пожар, то взрыва не произойдет;

– взрывопожароопасность паро-, газо- и пылевоздушных смесей обусловлена преимущественно опасностью возникновения неконтролируемого взрыва, продукты которого при определенных условиях способны инициировать пожар.

Взаимосвязь терминов, используемых в нормативных документах, относящихся к пожаровзрывоопасности технологической среды, приведена на рис. 19.

Если же за основу взять приведенное выше определение взрывоопасности ОЯТЦ, то к взрывоопасным следует отнести технологические среды, вещества и материалы, применяемые и образуемые на ОЯТЦ, способные в определенных условиях переходить в состояния, при которых не исключается возможность взрыва с радиационным воздействием и (или) другими возможными воздействиями опасных и вредных факторов взрыва на работников (персонал), население, окружающую среду, системы и элементы ОЯТЦ.

Пожаровзрывоопасность веществ, смесей, технологических сред обуславливает пожаровзрывоопасность технологических процессов, осуществляемых с их участием.

Согласно [2]: *«технологический процесс – совокупность физико-химических или физико-механических превращений веществ и изменение значений параметров материальных сред, целенаправленно проводимых в аппарате (системе взаимосвязанных аппаратов, агрегате, машине и т. д.)».*



Рис. 19. Взаимосвязь терминов, относящихся к пожаровзрывоопасности веществ и материалов

В [2] приведено следующее определение взрывоопасного технологического процесса. Это – «технологический процесс, проводимый при наличии в технологической аппаратуре материальных сред, способных вызвать взрыв при отклонении от заданных параметров процесса или состояния оборудования».

На ОЯТЦ взрывоопасный технологический процесс может осуществляться не целенаправленно, а в результате самопроизвольных превращений в радиационно-химической среде под воздействием ионизирующего излучения, например, при хранении РАО.

Взрыв может возникать при наличии:

- источника инициирования взрыва;
- источника зажигания (воспламенения);

- воздействия пламени;
- сотрясения;
- трения;
- внешнего воздействия на ОЯТЦ.

К источникам возникновения взрыва относятся:

- «источник зажигания – средство энергетического воздействия, инициирующее возникновение горения» [1];
- «источник воспламенения – средство энергетического воздействия, инициирующее возникновение взрыва или горения» [2].

К взрывоопасным веществам и материалам, применяемым и образующимся при осуществлении деятельности ОЯТЦ, относятся следующие вещества и материалы:

- водород, который образуется в ряде технологических процессов и является обязательным продуктом радиолизаводных и органических растворов. Он постоянно присутствует в радиационно-химических технологических системах ОЯТЦ и образует взрывоопасные смеси с кислородом и воздухом;

- пероксид водорода, который образуется в результате радиолиза водных растворов;

- экстракционные системы, состоящие из органических веществ (экстрагентов и разбавителей), азотной кислоты высокой концентрации, нитратов радиоактивных металлов и представляющие собой смеси горючих веществ, способных выделять горючие газы, с окислителями;

- химические системы, состоящие из ионселективных сорбентов (полимеров с высокоразвитой поверхностью) и водных растворов, содержащих азотную кислоту высокой концентрации и нитраты радиоактивных металлов, а также ионселективные сорбенты, содержащие нитраты металлов.

Ряд взрывоопасных веществ содержится в применяемых на РХП технологических системах, состоящих из водородо- и кислородосодержащих соединений азота (рис. 20).

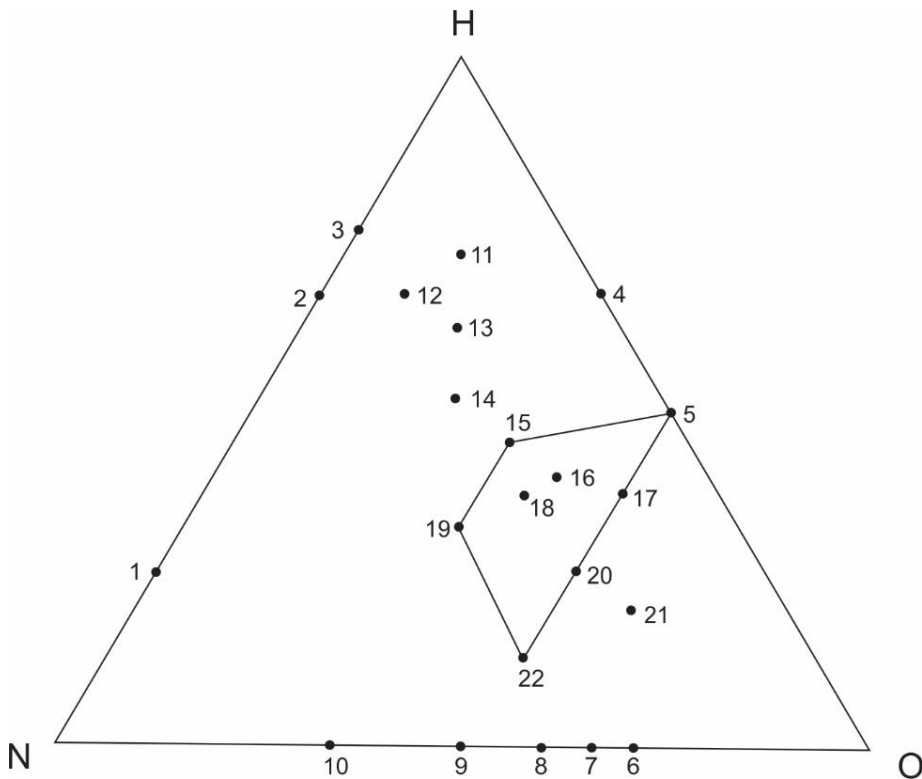


Рис. 20. Составы компонентов тройной системы H-N-O

Цифрами обозначены: 1 –  $\text{HN}_3$ , 2 –  $\text{N}_2\text{H}_4$ , 3 –  $\text{NH}_3$ , 4 –  $\text{H}_2\text{O}$ , 5 –  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 6 –  $\text{N}_2\text{O}_5$ , 7 –  $\text{NO}_2$ , 8 –  $\text{N}_2\text{O}_3$ , 9 –  $\text{NO}$ , 10 –  $\text{N}_2\text{O}$ , 11 –  $\text{NH}_4\text{OH}$ , 12 –  $\text{N}_2\text{H}_5\text{OH}$ , 13 –  $\text{NH}_2\text{OH}$ , 14 –  $\text{NH}_4\text{NO}_2$ , 15 –  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 16 –  $\text{NH}_3\text{OHNO}_2$ , 17 –  $\text{H}_3\text{NO}_4$ , 18 –  $\text{N}_2\text{H}_5\text{NO}_3$ , 19 –  $\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2$ , 20 –  $\text{HNO}_2$ , 21 –  $\text{HNO}_3$ , 22 –  $\text{HN}_3\text{O}_4$

К взрывоопасным веществам относят:  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{H}_4$ ,  $\text{H}_2\text{N}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HN}_3\text{O}_4$ ,  $\text{H}_3\text{NO}_4$ ,  $\text{HN}_3$  и ряд азидов, а также взрывоопасные смеси сильных восстановителей с сильными окислителями этих систем и соединения, в которых имеются атомы азота как с большими положительными, так и с большими отрицательными степенями окисления.

На рис. 20 показано расположение известных соединений в тройной системе водород – кислород – азот и выделена область составов, в которой концентрируются взрывоопасные соединения.

Ряд радиоактивных веществ, согласно определениям [51–53], являются пирофорными и способны самовозгораться на воздухе с переходом реакции в режим взрыва.

К пирофорным материалам, применяемым на ОЯТЦ, относятся: мелкодисперсные металлические уран, плутоний, цирконий, диоксид урана и полупрозрачный оксид плутония, гидрид, нитрид, карбид урана.

Отнесение материалов, применяемых на ОЯТЦ, к пирофорным обусловлено тем, что при уменьшении размера частиц и, соответственно, увеличении реакционной поверхности, скорость их окисления возрастает настолько, что они становятся способными самовоспламеняться при контакте с воздухом при комнатной температуре.

Пирофорные частицы могут образовываться при высыхании из растворов и растрескивании материалов с высокоразвитой поверхностью, например, сорбентов. Пирофорные материалы могут накапливаться в производственных помещениях ОЯТЦ в виде отложений пыли на поверхностях (аэрогелей) или в виде пылегазовых облаков (аэрозвесей).

## **2.3. Показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов, применяемых на объекте ядерного топливного цикла**

### **2.3.1. Перечень показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов**

Основные показатели взрывоопасности веществ и материалов, применяемых и образующихся на ОЯТЦ, входят в число установленных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов.

Пожаровзрывоопасность веществ и материалов определяется показателями, выбор которых зависит от агрегатного состояния вещества и условий его применения [1, 32].

Показатели пожаровзрывоопасности и пожарной опасности веществ и материалов используются для установления требований к применению веществ и материалов и расчета пожарного риска [1].

Показатели взрывопожароопасности обращающихся веществ при рабочих параметрах процесса указываются в их паспортах безопасности [49].

При определении пожаровзрывоопасности веществ и материалов различают [32]:

– газы – вещества, давление насыщенных паров которых при температуре 25 °С превышает 101,3 кПа;

– жидкости – вещества температура плавления или каплепадения которых меньше 50 °С;

– твердые вещества и материалы – вещества с температурой плавления или каплепадения больше 50 °С;

– пыли – твердые дисперсные материалы, взвеси которых способны в определенном диапазоне концентрации частиц распространять волну горения, представляющую как опасность пожара, так и опасность взрыва.

Установленный в [32] критерий для различия твердых и жидких веществ можно интерпретировать как максимально возможное значение, достигаемое в практических случаях без применения источника нагрева. Такая трактовка представляет интерес при категорировании веществ на пирофорные и непирофорные с учетом определения, приведенного в табл. № 7.

В связи с этим, за максимальное значение комнатной температуры, применительно к рассмотрению пирофорных свойств материалов, представляется допустимым принять 50 °С.

Перечень показателей, необходимых для оценки пожаровзрывоопасности и пожарной опасности веществ и материалов, в зависимости от их агрегатного состояния, приведен в [1].

В номенклатуру необходимых показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов входят соответственно для газов (г), жидкостей (ж), твердых веществ (т), пылей (п) – 36 показателей [1], среди которых можно выделить следующие показатели, наиболее востребованные для оценки взрывоопасности веществ и материалов:

– группа горючести (г, ж, т, п);

– способность гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами (г, ж, т, п);

– температура вспышки (ж, т);

– температура воспламенения (ж, т, п);

– температура самовоспламенения (г, ж, т, п);

– температурные пределы распространения пламени (воспламенения) (г, ж);

– нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени (воспламенения) в газах и парах (г, ж, п);

– минимальное взрывоопасное содержание кислорода (г, ж, п);

- минимальная флегматизирующая концентрация газообразного флегматизатора (г, ж, п);
- минимальная энергия зажигания (г, ж, п);
- максимальное давление взрыва (г, ж, п);
- скорость нарастания давления взрыва (г, ж, п).

Согласно ст. 133 [1] обязательными для включения в техническую документацию являются 11 показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов, причем для каждого их агрегатного состояния установлены по пять обязательных показателей. Из этого числа хотя бы один показатель обязательно должен быть включен в техническую документацию.

Распределение обязательных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов по их агрегатным состояниям показаны на рис. 21.

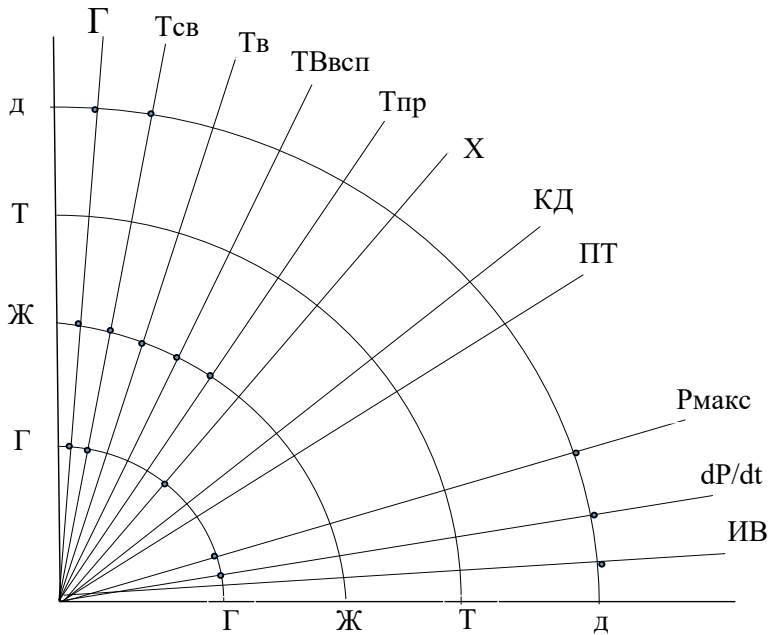


Рис. 21. Диаграмма распределения обязательных показателей пожаровзрывоопасности в зависимости от агрегатного состояния вещества

ИВ – индекс взрывоопасности;  $R_{\text{макс}}$  – максимальное давление взрыва;  $dP/dt$  – скорость нарастания давления взрыва;  $x$  – концентрационные пределы распространения пламени;  $T_{\text{св}}$  – температура самовоспламенения;  $T_{\text{в}}$  – температура воспламенения;  $T_{\text{всп}}$  – температура вспышки; ТПП – температурные пределы распространения пламени; ГГ – группа горючести; КД – коэффициент дымообразования; ПТ – показатель токсичности продуктов горения



Из рис. 21 следует, что в перечень обязательных показателей пожаровзрывоопасности для всех агрегатных состояний веществ входят два показателя: группа горючести и температура самовоспламенения, а показатели, непосредственно относящиеся к взрывоопасности (максимальное давление взрыва, скорость нарастания давления взрыва, индекс взрывоопасности), являются обязательными для газов (кроме индекса взрывоопасности) и пылей.

Индексы взрывоопасности (пожаровзрывоопасности) представляют собой обозначения групп, на которые разбивают диапазон значений взрывоопасных характеристик технологических сред (веществ, материалов). При этом, частные индексы относят к одной или родственной группе характеристик, а общий индекс является комбинацией (произведением) частных индексов.

Количество показателей, необходимых и достаточных для характеристики пожаровзрывоопасности веществ и материалов в условиях их производства, переработки, транспортировки и хранения, определяет разработчик обеспечения ПVB объекта [32].

Исходя из опыта работы, авторы [34] полагают, что для оценки безопасных условий эксплуатации и вероятности возникновения аварий на объектах РХП необходимыми и достаточными являются:

- для газовых смесей – величина нижнего концентрационного предела распространения пламени по содержанию горючего газа, об. %;
- для горючих жидкостей – величина температуры вспышки горючей жидкости, °С или величина нижнего температурного предела распространения пламени горючей жидкости, °С;
- для смесей восстановителей с окислителями – величина максимальной скорости газовыделения в смесях восстановителей с окислителями, л/мин·л(кг) (восстановителя) и величина температуры начала экзотермических процессов в смесях восстановителей с окислителями («стартовая» температура теплового взрыва), °С.

В [16, 32, 34] сообщается, что значения показателей пожаровзрывоопасности отличаются для различных условий осуществления химико-технологического процесса:

- открытого или закрытого сосуда (тигля);
- облученных или необлученных смесей.

В [34] отмечено, что значения показателей пожаровзрывоопасности зависят от:

- наличия или отсутствия перемешивания смесей горючих жидкостей;
- поглощенной дозы облучения;
- количества фаз в системе.

В [32] приведены методы расчета температуры вспышки, температуры воспламенения индивидуальных жидких веществ, концентрационных пределов распространения пламени по газо-, паровоздушным смесям, нижнего концентрационного предела распространения пламени по пылевоздушным смесям (аэрозвесьям), температурных пределов распространения пламени, расчета скорости нарастания давления при взрыве газов и паров жидкостей.

Однако в [7] отмечено, что пока не существует строгой теории концентрационных пределов воспламенения, вследствие чего нижние и верхние концентрационные пределы воспламенения, измеренные с помощью разных методик, могут сильно различаться.

Определения показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов приведены в нормативном документе [32]. Наиболее востребованные из них для оценки взрывоопасности веществ и материалов, применяемых и образующихся на ОЯТЦ, представлены в табл. № 8.

Таблица № 8

**Определения показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов**

№ п/п	Формулировка определения
1	«Горючие (сгораемые) – вещества и материалы, способные самовозгораться, а также возгораться при воздействии источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления». Из группы горючих веществ и материалов выделяют легковоспламеняющиеся вещества и материалы
2	Легковоспламеняющимися называют <i>«горючие жидкости с температурой вспышки не более 61 °С в закрытом тигле или 66 °С в открытом тигле, зафлегматизированных смесей, не имеющих вспышку в закрытом тигле»</i>

№ п/п	Формулировка определения
3	Способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами – это качественный показатель, характеризующий особую пожарную опасность некоторых веществ
4	Вспышка – быстрое сгорание газо- и паровоздушной смеси над поверхностью горючего вещества, сопровождающееся кратковременным видимым свечением
5	Температура вспышки – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает
6	Температура воспламенения – наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение
7	Температура самовоспламенения – наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается самовоспламенение вещества
8	Температурные пределы распространения пламени (воспламенения) – такие температуры вещества, при которых его насыщенный пар образует в окислительной среде концентрации, равные соответственно нижнему (нижний температурный предел) и верхнему (верхний температурный предел) концентрационным пределам распространения пламени
9	Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени – минимальное (максимальное) содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания
10	Минимальное взрывоопасное содержание кислорода – такая концентрация кислорода в горючей смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, меньше которой распространение пламени в смеси становится невозможным при любой концентрации горючего в смеси, разбавленной данным флегматизатором
11	Минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора – наименьшая концентрация флегматизатора в смеси с горючим и окислителем, при которой смесь становится неспособной

№ п/п	Формулировка определения
	к распространению пламени при любом соотношении горючего и окислителя
12	Минимальная энергия зажигания – наименьшая энергия электрического разряда, способная воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь горючего вещества с воздухом
13	Максимальное давление взрыва – наибольшее избыточное давление, возникающее при дефлаграционном сгорании газо-, паро- или пылевоздушной смеси в замкнутом сосуде при начальном давлении смеси 101,3 кПа
14	Скорость нарастания давления взрыва – производная давления взрыва при дефлаграционном горении (дефлаграции) на восходящем участке зависимости давления взрыва горючей смеси в замкнутом сосуде от времени

В [16] приведены дополнительные термины и их определения, применяемые для оценки ПВБ технологических процессов радиохимических производств:

– скорость газовыделения – количество газообразных продуктов, выделяющихся в единицу времени при разложении химических веществ или взаимодействии компонентов смесей химических веществ;

– температура возникновения теплового взрыва – температура химического вещества (смеси химических веществ), при которой тепловыделение в зоне химической реакции начинает превышать потери тепла и происходит саморазогрев реагирующей системы;

– термическая стабильность химических веществ и смесей – способность к сохранению исходного состава под действием тепловых нагрузок;

– удельный объем газообразных продуктов теплового взрыва – объем парогазообразных продуктов, выделяющийся на единицу объема (массы) вещества (смеси) в результате теплового взрыва.

### 2.3.2. Значения показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов, применяемых и образуемых на объекте ядерного топливного цикла

Анализ значений показателей пожаровзрывоопасности, приведенных в [31], позволяет отметить следующие особенности, присущие материалам, применяемым или образующимся при осуществлении деятельности ОЯТЦ.

На рис. 22 показаны значения максимального давления взрыва и время его достижения (определенное по скорости нарастания давления взрыва) для ряда пирофорных материалов, в сравнении с широко распространенным взрывчатым веществом – тринитротолуолом (ТНТ) и ТБФ, который являлся одним из основных компонентов технологической среды при аварийном взрыве на АО СХК в 1993 г.

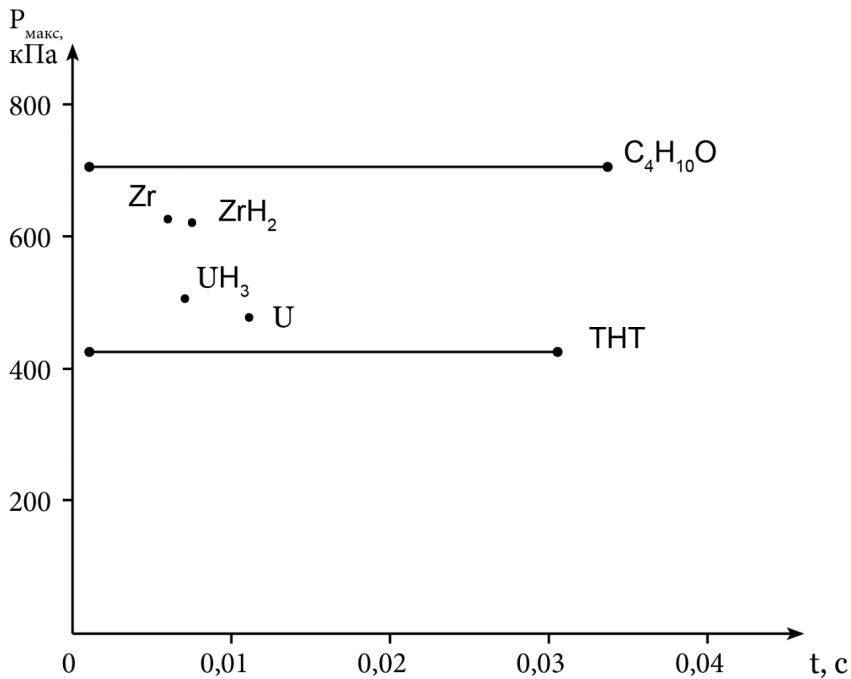


Рис. 22. Значения максимального давления взрыва и времени его достижения

Из рис. 22 следует, что время достижения максимального давления при взрыве приведенных пирофорных материалов находится в диапазоне 0,005–0,01 с, что заметно меньше, чем при взрыве ТБФ или ТНТ. Максимальное давление при взрыве этих пирофорных материалов превышает максимальное давление при взрыве ТНТ и составляет порядка 500–600 кПа, что меньше значения, достигаемого при взрыве ТБФ.

Характер влияния природы флегматизатора (инертной среды) на значения минимального взрывоопасного содержания кислорода, достаточного для возникновения взрыва пирофорных материалов и водорода, показан на рис. 23.

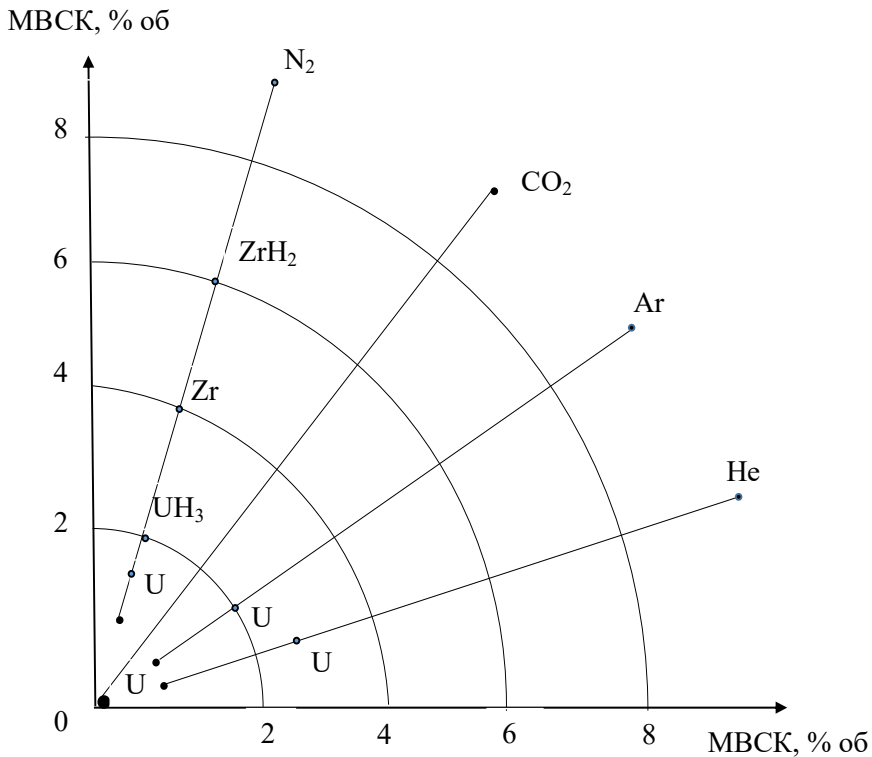


Рис. 23. Значения минимального взрывоопасного содержания кислорода в различных инертных средах

Для урана значения этого показателя пожаровзрывоопасности изменяются от 0 об. % для среды углекислого газа до 2,5 об. % для смеси кислорода с гелием. Промежуточные значения соответствуют использованию в качестве флегматизатора аргона и азота.

Таким образом, с точки зрения обеспечения ПВБ ОЯТЦ, контакт мелкодисперсного металлического урана с углекислым газом должен быть исключен. Из рис. 23 также следует, что в среде азота гидриды циркония и урана способны взрываться при больших значениях содержания кислорода по сравнению с металлическими цирконием и ураном.

Водород в среде азота занимает промежуточное положение между цирконием и его гидридом. Для него углекислый газ оказывает большее флегматизирующее действие по сравнению с азотом.

Согласно справочным данным [12] концентрационные пределы распространения пламени для урана, циркония и их гидридов находятся в диапазоне 40–80 г/м<sup>3</sup>, что заметно меньше по сравнению с карбидом циркония и нитратом аммония (рис. 24).

Как следует из рис. 24, нижние концентрационные пределы распространения пламени для бутила меньше, а для гидразина и аммиака больше, чем для водорода, а верхний концентрационный предел распространения пламени для гидразина отсутствует (равен 100 %).

На рис. 25 показано влияние различных флегматизаторов (инертных веществ) на минимальную их флегматизирующую концентрацию водорода применительно к его попаданию в различные окислительные среды (кислород, воздух, окислы азота). Согласно рис. 25 для большинства указанных флегматизаторов и окислительных сред минимальная флегматизирующая концентрация для водорода составляет 60–80 об. %. Наименьшее значение этого параметра в среде воздуха относится к смеси углекислого газа (85 масс. %) с хладоном 114B2 (15 масс. %). При использовании в качестве флегматизатора азота в среде окислов азота наименьшую окислительную способность обнаруживает монооксид азота.

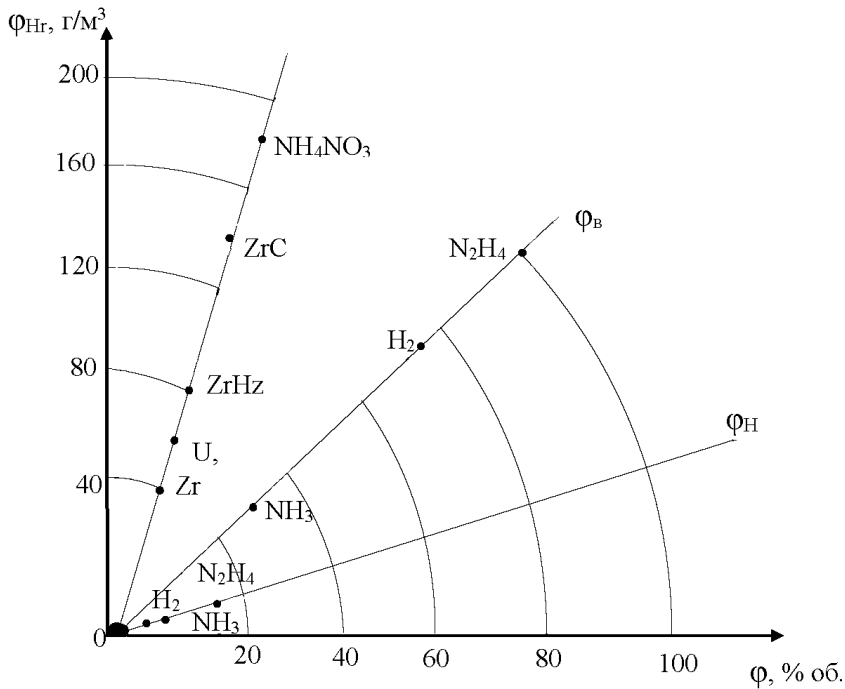


Рис. 24. Значения концентрационных пределов распространения пламени

Согласно диаграмме Шапиро – Мофетти нижний предел воспламенения сухой водородо-воздушной смеси составляет 4 об. %, верхний – 75 об. %. При добавлении в систему водяного пара верхний и нижний пределы сближаются, и при достижении концентрации водяного пара порядка 60 об. % смесь делается негорючей. Пределы детонации водородсодержащей парогазовой смеси, приведенные на диаграмме Шапиро – Мофетти, составляют 18 об. % – нижний предел и 59 об. % – верхний предел. При добавлении водяного пара пределы детонации сближаются аналогично пределам воспламенения, при концентрации водяного пара более 35 об. % детонация невозможна [67].



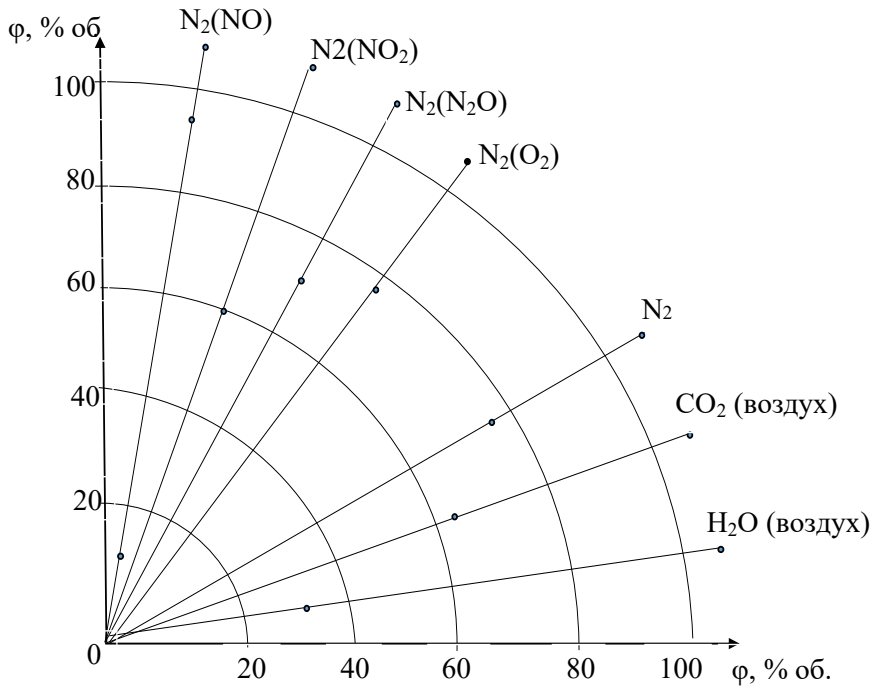


Рис. 25. Значения минимальной флегматизирующей концентрации флегматизаторов для водорода (в указанных окислительных средах)

Как следует из рис. 26, минимальная энергия зажигания для пирофорных материалов (урана, циркония и их гидридов) находится на уровне 5–60 мДж, что существенно выше по сравнению с водородом (0,017 мДж) или ацетиленом (0,01 мДж). Для приведенных органических соединений минимальная энергия зажигания превышает 1 Дж, а для аммиака – меньше 1 Дж.

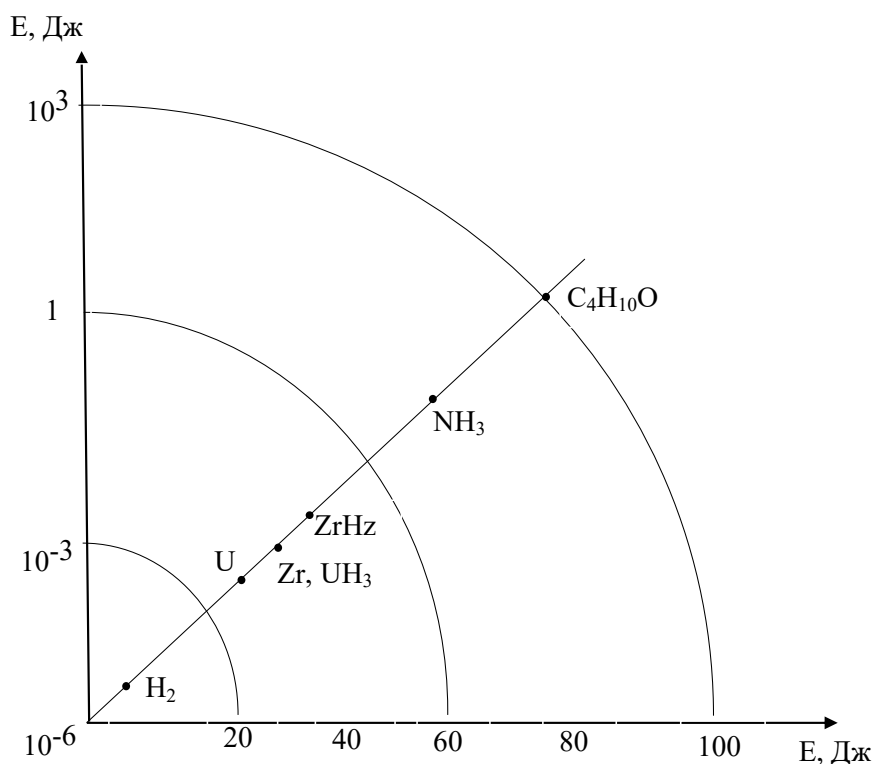


Рис. 26. Значения минимальной энергии зажигания

На рис. 27 показаны значения температур вспышки, воспламенения и самовоспламенения для органических и неорганических соединений, применяемых на ОЯТЦ. Из приведенных данных следует, что наименьшую пожаровзрывоопасность среди указанных соединений представляет трибутилфосфат. Обращает на себя внимание также низкое значение температуры самовоспламенения гидразина.

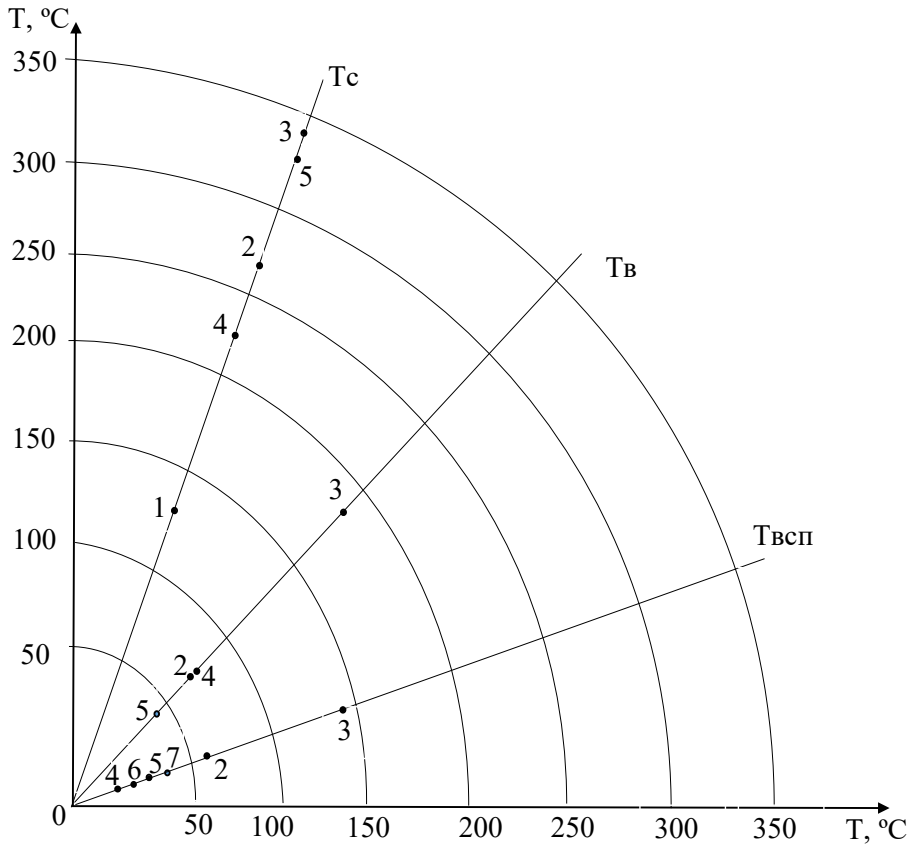


Рис. 27. Температурные показатели пожаровзрывоопасности для жидких веществ

1 –  $N_2H_4$ ; 2 –  $N_2H_4 \cdot H_2O$ ; 3 – ТБФ; 4 – керосин;  
5 – н-бутиловый спирт; 6 – бутилнитрат

### **2.3.3. Характеристики способности взрываться веществ и материалов, применяемых и образуемых на объектах ядерного топливного цикла**

Согласно [32]: «способность взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами – это качественный показатель, характеризующий особую пожарную опасность некоторых веществ».

Целый ряд материалов, используемых и образуемых на ОЯТЦ, представляет собой повышенную пожаровзрывоопасность при избирательном взаимодействии с некоторыми веществами. Ниже приведены примеры специфичного проявления пожаровзрывоопасности таких материалов.

#### **1. Характеристики металлического урана**

Известны случаи самовозгорания куска урана, лежащего на сухом льду, а также самопроизвольного взрыва уранового образца при комнатной температуре. Самовозгорание урана возможно в вакууме, под слоем воды и даже в атмосфере влажного аргона. Механическая нагрузка повышает склонность урана к самовозгоранию. Водяной пар реагирует с ураном при 150–250 °С. Взаимодействие происходит более энергично, чем с кислородом. При 750 °С уран активно взаимодействует с диоксидом углерода. В некоторых случаях наблюдалось самопроизвольное воспламенение порошка урана в диоксиде углерода. Уран в виде стружки сгорает в оксиде азота при 400–500 °С [31].

Водяной пар окисляет уран более энергично, чем кислород, причем наряду с двуокисью образуется гидрид урана. Заметная реакция наступает при 150–250 °С.

Металлический уран, получаемый в результате восстановления его оксидов, может обладать пирофорными свойствами.

Так, при кальциетермическом восстановлении диоксида урана с получением продуктов реакции в виде спека было установлено следующее [54].

По внешнему виду спека можно с достаточной точностью определить качество получившегося порошка урана. Плотный спек зеленого цвета указывает на наличие избыточного кальция, растворенного в оксиде кальция, и на нормальное протекание реакции при высокой

температуре, которое обеспечивает получение непирофорного порошка урана со сфероидальной формой частиц. Хрупкий спек серого или черного цвета состоит из СаО, в которой растворено мало кальция. В нем содержатся частицы урана несферической формы, обладающие пирофорными свойствами.

В [54] отмечено, что при переработке урановых отходов стружку размером менее 20 меш. необходимо удалять в процессе обезжиривания и травления во избежание ее возгорания во время травления.

## **2. Характеристики диоксида урана**

Порошки  $UO_2$  с размерами частиц менее 0,05 мк при 0 °С и 0,4 мк при 150 °С обладают пирофорными свойствами в среде кислорода [54].

На воздухе порошок  $UO_2$  окисляется при комнатной температуре. Скорость окисления зависит от размера частиц и от характера поверхности, подвергающейся окислению. Свежевосстановленная поверхность  $UO_2$  даже при -183 °С быстро адсорбирует кислород. Порошок, размер частиц которого составляет около 1 мк, после пребывания на воздухе в течение 1 месяца при комнатной температуре, как правило, окисляется до состава, близкого к  $UO_{2,02}$ . Порошок с частицами меньшего размера, около 0,1 мк, окисляется значительно быстрее до состава  $UO_{2,25}$ , причем процесс сопровождается столь интенсивным нагреванием, что происходит частичное превращение двуокиси урана в  $U_3O_8$ . На термограмме наблюдаются два пика: при 200 и 400 °С [54].

## **3. Характеристики нитрида урана**

Температура воспламенения UN в сухом кислороде может колебаться от комнатной температуры для мелкозернистых порошков до примерно 300 °С для спеченных изделий. Свежеприготовленный порошок UN с удельной поверхностью 0,3 м<sup>2</sup>/г мгновенно загорается при комнатной температуре в кислороде, если давление последнего выше 3 мм рт. ст. Загорание является следствием локального нагрева внешней поверхности частиц порошка. Если же давление кислорода ниже указанного, то происходит медленное окисление UN с двумя различимыми стадиями без выделения азота.

В воде как холодной, так и нагретой UN сравнительно устойчив. В кипящей воде на UN образуется тонкая окисная пленка, обладающая защитными свойствами [55].

В [56] сообщается о пирофорности нитрида урана при размерах частиц менее 20 мкм.

В [57] приводятся сведения о том, что тонкодисперсные порошки нитрида урана с размерами частиц 2–12 мкм пирофорны и на воздухе при комнатной температуре способны самовозгораться. Нитрид урана в виде тонкого порошка легко воспламеняется в кислороде, и при размере частиц 70 мкм с нитридом урана следует работать в инертной атмосфере.

Измельчение нитрида урана производят в атмосфере аргона высокой чистоты, содержащего не более 0,001 мас. % кислорода во избежание окисления нитрида. По сравнению с порошками карбидного уран-плутониевого топлива, порошки нитридного топлива менее пирофорны, и с ними можно работать в атмосфере аргона, азота или гелия коммерческой чистоты [57].

В [58] приведены результаты исследования пирофорных свойств смеси нитридов урана и плутония.

Эксперименты проводились на необлученном моонитриде урана (НУ) и смешанном нитриде  $U_{0,9}Pu_{0,1}N$  (СНУП) различного фракционного состава. Выполнены эксперименты по определению скорости распространения фронта горения (окисления) по слою НУ и СНУП и взрывоопасности аэрозвеси мелкодисперсных частиц этих материалов. Исследования проводили при концентрации кислорода в азотно-воздушной атмосфере бокса 21, 10, 7 и 3 % об.

Установлено, что частицы НУ и СНУП обладают пирофорными свойствами при концентрации кислорода более 10 % об. Окисление порошкообразного СНУП состава  $U_{0,9}Pu_{0,1}N$  в газовой среде с содержанием кислорода 3 % об. возможно при нагреве материала до 300 °С.

При распылении аэрозвеси частиц НУ и СНУП в воздушную атмосферу (21 % кислорода) происходит самопроизвольное окисление материала с выделением тепла.

#### 4. Характеристики гидрида урана

В [54] приведены сведения о пирофорности гидрида урана.

Гидрид урана является очень активным соединением. Он пирофорен и требует осторожного обращения.

Гидрид урана реагирует со многими газами. С кислородом и с воздухом он соединяется очень бурно с образованием воды и  $U_3O_8$ . Азот и двуокись углерода начинают реагировать с гидридом урана при температуре 200–225 °С. С газообразными галоидоводородными соединениями гидрид урана взаимодействует с образованием четырехвалентных галоидных солей.

Гидрид урана является сильным восстановителем. При взаимодействии больших количеств этого соединения с водой происходит бурная экзотермическая реакция с образованием водорода и  $UO_2$ . Если же в воду погрузить небольшие количества гидрида урана, то реакция идет очень медленно. Аналогично гидрид взаимодействует с кислотами, не обладающими окислительными свойствами.

Азотная кислота реагирует с гидридом урана довольно бурно с образованием уранилнитрата, в некоторых случаях реакция сопровождается воспламенением. Щелочи очень слабо или совершенно не взаимодействуют с гидридом урана. Бензол, толуол, спирт, ацетон и другие органические растворители, не содержащие галоидов, не реагируют с гидридом урана.

Органические растворители, содержащие галоиды, представляют большую взрывную опасность при контакте с гидридом.

#### 5. Характеристики карбида урана

В [59] отмечена пирофорность и самовоспламеняемость тонких порошков карбида урана.

В [54] сообщается, что карбиды урана пирофорны, при растирании легко загораются, давая снопы искр. На воздухе карбиды урана интенсивно окисляются при 400 °С до  $U_3O_8$  и  $CO_2$ . При комнатной температуре на воздухе они разлагаются, вероятно, вследствие реакции с водяным паром.

#### 6. Характеристика силицида урана

В [59] отмечено, что порошок силицидов урана весьма пирофорен.

## 7. Характеристики металлического плутония

Согласно [60] металл с большой удельной площадью поверхности (стружка, порошок) самопроизвольно возгорается на воздухе при температуре 150–200 °С. В таких случаях нагревание металла в воздухе до 150–200 °С превращает большую часть поверхностного оксида в кубический полоторный оксид. Быстрое окисление полоторного оксида снова до диоксида вызывает всплеск тепла, достаточный, чтобы нагреть стружку с большой площадью поверхности до температуры протекания автотермической реакции при 500 °С.

Коррозия металлического плутония во влажном воздухе проходит в 200 раз быстрее, чем в сухом воздухе при комнатной температуре, и на пять порядков быстрее при 100 °С. Механизмы коррозии плутония за счет водного катализа выяснены только недавно (1996 г.). Обычно считалось, что максимальная концентрация кислорода в оксиде плутония возможна в диоксиде  $\text{PuO}_{2,0}$ . Однако Стейкбек и Хашке показали, что в присутствии газообразной или жидкой воды образуется сверхстехиометрического состава оксид плутония  $\text{PuO}_{2+x}$ . Наибольшее значение  $x$ , которое они измерили, равно 0,26. В процессе быстрого окисления в присутствии адсорбированной воды на границе газ-твердое тело образуется водород и более высокий оксид. При этом катионы  $\text{Pu(IV)}$  в  $\text{PuO}_2$  заменяются на  $\text{Pu(V)}$  и равное число ионов  $\text{O}^{2-}$  или  $\text{OH}^-$ , находящихся в междоузлиях. Во влажном воздухе образовавшийся водород соединяется с адсорбированным в результате диссоциации атомарным кислородом, снова образуя на поверхности воду. Катализируемый водой цикл диссоциации и синтеза воды происходит одновременно с тем, как  $\text{Pu}$  и  $\text{O}_2$  превращаются в оксид в реакции металл – вода, которая характеризуется большой скоростью. Это изменение в составе оксида сопровождается также изменением цвета от бледно-желтого до хаки и зеленого.

Согласно [61] плутоний имеет исключительную пирофорность при нагреве до 470–520 °С.

Во влажной среде на поверхности плутония образуются гидриды переменного состава. Реагируя с кислородом, плутоний воспламеняется даже при комнатной температуре. В результате окисления плутоний расширяется на 70 % и может повредить содержащий его контейнер [62].

При температуре 135 °С плутоний самовоспламеняется благодаря реакции с кислородом, а если его поместить в атмосферу тетрахлорметана, то он взорвется [63].



## 8. Характеристики оксидов плутония

Согласно [47] оксиды плутония состава: гексагональный  $\text{Pu}_2\text{O}_3$ , кубический  $\text{PuO}_{1,5}$ , кубический  $\text{PuO}_{1,61}$  являются пирофорными.

В [60] сообщается, что Ф. Г. Решетников описал взрыв, который случился в 1949 г. при шлифовке стеклянным стержнем образца, по предположению плутония. Подобным образом Хашке описывает серо-стального цвета продукт, образованный при термическом разложении  $\text{PuOH}$ . Этот материал претерпел интенсивную экзотермическую реакцию с кислородом, разрушившую кварцевый контейнер микровесов.

Установлено, что водяные пары реагируют с  $\text{PuO}_2$  с образованием водорода. Образование водорода в контейнерах для хранения является поводом для беспокойства относительно безопасности, поэтому стандарты для стабилизации, упаковки и хранения содержащих плутоний материалов очень строгие. Чтобы отвечать этим стандартам, материалы перед хранением или транспортированием должны подвергаться термической стабилизации прокаливанием на воздухе и последующей герметизации в сварных контейнерах из нержавеющей стали.

## 9. Характеристики гидридов плутония

Гидриды плутония являются твердыми веществами черного цвета, напоминающими металл, поведение которых зависит от размера частиц и состава. Цветовой диапазон – от серебристого вблизи  $x = 2$  до черного при большем значении  $x$ . Малые частицы могут быть исключительно реакционноспособными по отношению к  $\text{O}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , и порошки, близкие по составу к  $\text{PuH}_2$ , могут быть пирофорными или спонтанно загораться на воздухе. Гидриды могут также реагировать с  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$ , хотя эти реакции довольно медленные. Из этого следует, что все манипуляции и хранение должны производиться в инертной атмосфере [60].

## 10. Характеристика карбида плутония

Обнаружено, что порошковый  $\text{PuC}_{1-x}$  химически активен и иногда пирофорен [60].

## 11. Характеристики циркония

В [11] приведены следующие сведения о пожаровзрывоопасности циркония.

Тонкодисперсный цирконий имеет черный цвет и по виду похож на уголь, он горит на воздухе, а также в атмосфере  $N_2$  и  $CO_2$ . Взвесь порошка Zr в воздухе, содержащая 45–300 мг/л, легко взрывается. Порошок циркония почти всегда содержит значительное количество гидрида  $ZrH_2$ .

Увлажненный порошок циркония горит интенсивнее, чем сухой (система  $2 H_2O + Zr$  способна к горению и взрыву), а тушение горящего циркония допустимо только засыпкой порошкообразными  $CaF_2$  или  $CaO$ , так как  $H_2O$ ,  $CaCl_2$ ,  $CO_2$  и даже  $CaCO_3$  энергично реагируют с цирконием.

Известно, что при работе с тонкодисперсным порошком циркония (2 – 5 мкм) имели место несчастные случаи.

Отмечено, что температура воспламенения тонкодисперсного порошка циркония около 85 °С. «Он перевозится и, поскольку возможно, обрабатывается водой».

Грубые фракции Zr-порошков имеют температуру воспламенения порядка 180–200 °С.

Zr – порошок с размером частиц 10 мкм и более расценивается как малоопасный в обращении.

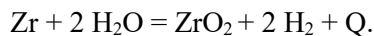
Циркониевые сплавы устойчиво горят при содержании циркония до 80 %.

В [17] приведены следующие сведения о пирофорности циркония.

Тонкие порошки циркония могут самовоспламеняться на воздухе, а увлажненные – взрываться. В этом отношении цирконий является самым опасным из металлов, используемым в пиротехнике. Порошок воспламеняется при температурах выше 260 °С. Компактный металл стоек к нагреванию.

Согласно [22] взвесь порошка Zr в воздухе, содержащая 45–300 мг/л легко взрывается. Порошок циркония всегда содержит значительное количество гидрида  $ZrH_2$ .

В [64] приведены сведения о пароциркониевой реакции. При взаимодействии водяного пара с металлическим цирконием протекает химическая реакция:



Взаимодействие циркония с паром происходит на протяжении всего времени от начала реакции до момента взрыва.

Согласно [65] сплавы циркония с серебром, медью или золотом самовозгораются при трении. Цирконий при сплавлении с серебром, медью или золотом становится более воспламеняемым, возгорается и взрывается при трении. Стружка и порошки титана, циркония и гафния более активны, чем компактные металлы, обладают пирофорными свойствами, легко загораются. При горении порошков циркония развивается исключительно высокая температура. Циркониевая пыль с размерами частиц менее 10 мкм способна на воздухе взрываться.

Характер взаимодействия металлов с парами воды определяется температурой: выше 800 °С – образуются двуокиси и выделяется водород, ниже 800 °С – взаимодействие сопровождается образованием окислов и гидридов.

Известно, что измельченный порошок циркония, диспергированный в воздухе, возгорается при комнатной температуре, причем горение может принять взрывной характер. Наблюдались случаи, когда увлажненные обрезки циркония, упакованные в бочки и хранившиеся под открытым небом, самовозгорались со взрывом. Несмотря на эти факты, практикой установлено, что при резке твэлов и сборок с циркониевой оболочкой обрезки циркония «искрят, но не горят».

В [59] сообщается о принятии мер, не допускающих самовозгорания скапливающейся на фильтрах пыли, образующейся при резке и растворении твэлов.

## 12. Характеристики гидроксида циркония

В [17] приведены следующие сведения о гидроксиде циркония.

Циркония гидрид,  $ZrH_x$ , где  $x \sim 1,67-1,99$ .

Цирконий легко адсорбирует водород уже при комнатной температуре, образуя хрупкий металлоподобный материал. В порошке имеет цвет от темно-серого до черного. Оптимальная температура поглощения водорода – около 300 °С (под давлением). Выше 100 °С при обычном давлении начинает выделять водород.

## 13. Характеристики водорода

Наибольшую взрывоопасность водород имеет при объемном отношении водорода и кислорода 2:1 или водорода и воздуха приблизительно 2:5, так как в воздухе кислорода содержится примерно 21 %. Считается, что

взрывоопасные концентрации водорода с кислородом возникают от 4 до 96 об. %, а при смеси с воздухом от 4 до 75 (74) об. %. Такие цифры фигурируют сейчас в большинстве справочников, и ими вполне можно пользоваться для ориентировочных оценок. Однако следует иметь в виду, что более поздние исследования (примерно конец 80-х г.) выявили, что водород в больших объемах может быть взрывоопасен и при меньшей концентрации. Чем больше объем, тем меньшая концентрация водорода опасна [66].

В случаях, когда возможно создание «пограничных» концентраций в больших объемах (помещение, ангары, цеха) следует иметь в виду, что реально взрывоопасная концентрация может отличаться от 4 % как в большую, так и в меньшую стороны. При расчетах допустимую концентрацию водорода в воздухе аккумуляторных помещений принимают меньше нижнего предела взрывоопасной концентрации, то есть с некоторым коэффициентом запаса от взрыва. В воздухе аккумуляторных помещений предприятий электросвязи и гидрометеослужбы допустимая концентрация водорода равна 0,7 %. На основании опыта нормирования содержания водорода ввиду возможности расслоения водорода в воздухе аккумуляторного помещения, а также с учетом того, что расход вентиляционного воздуха для разбавления серной кислоты в воздухе до предельно допустимой концентрации выше, чем для разбавления водорода, следует принять расчетную концентрацию водорода при определенном расходе воздуха, необходимого для вентиляции аккумуляторного помещения, равной 0,8 %, что составляет 20 % от нижнего предела взрываемости водородно-воздушной смеси [66].

Температура воспламенения водорода в смеси с воздухом составляет 625 °С при длительности воздействия источника нагрева 0,15 с и 575 °С с увеличением длительности нагрева до 15 с. Значения температуры воспламенения для водородно-воздушной смеси вблизи стехиометрического состава колеблется в широких пределах в зависимости от метода и условий исследований. Максимальное отклонение результатов превышает 500 °С. С уменьшением концентрации водорода в воздухе температура воспламенения понижается. При давлении 0,1 Мпа интервал температур воспламенения водорода в воздухе находится в пределах 530–630 °С. Температура воспламенения водорода возрастает при введении добавки паров воды. Однако поскольку известны случаи как положительного, так и отрицательного действия паров воды на реакцию

окисления водорода, этот эффект остается все еще не полностью ясным [66].

Взрывоопасная водородно-воздушная смесь может воспламениться от открытого пламени, горячей сигареты, накаливаемого предмета, искры любого происхождения. Даже слабой искры, возникшей в результате разряда статического электричества от человеческого тела, может быть достаточно для воспламенения водорода. Заряды статического электричества могут образоваться даже в хорошо заземленном оборудовании при хранении и переливании жидкого водорода [66].

При истечении газообразного или испарении жидкого водорода в атмосферу в создании взрывоопасного облака участвует не более 50 % водорода. Скорость, с которой горючее при испарении смешивается с воздухом, определяется скоростью диффузии и скоростью перемещения водородного облака вверх вследствие меньшей его плотности по сравнению с воздухом. Подъемный эффект является доминирующим для водорода [66].

Для прекращения диффузионного горения водорода, истекающего из трубопровода со скоростью 10 м/с, необходимо его разбавить 10 – кратным объемом азота [31].

Если количество водорода в газовой фазе превышает 2 (по об. %), требуется разбавлять выделяющиеся газы инертным газом [59].

Йод, даже в ничтожных концентрациях ( $< 10^{-4}$  моль), заметно снижает верхний (второй) предел воспламенения [66].

Радиолиз воды под действием излучения сопровождается выделением водорода со скоростью  $1 \text{ см}^3/(\text{Вт} \cdot \text{ч})$ . Герметичные сосуды могут взрываться просто по причине повышенного давления. Наряду с этим в сосудах, содержащих заметное количество плутония или продуктов деления (хранилища отходов, силикагелевые и ионообменные колонны, контейнеры с готовой продукцией, содержащей влагу, и др.), где предусматривается отсос водорода или продувка, концентрация водорода в выходящих газах не должна превышать 2 % (по об. %) [59].

Скорость взаимодействия водорода с кислородом сильно зависит от температуры. Если хранить смесь водорода с кислородом при комнатной температуре, то, как показывают термодинамические расчеты, понадобятся миллиарды лет, чтобы реакция синтеза воды завершилась. При 180 °С скорость реакции становится уже заметной и аналитическими методами можно обнаружить образование воды. При 300 °С реакция завершается за несколько суток, а при 580 °С – за несколько часов. При 600 °С (температура

красного каления) реакция идет быстро, но без взрыва, а при 700 °С – почти моментально со взрывом. Инициировать взаимодействия водорода с кислородом может не только нагревание, но и действие катализаторов, в особенности тонко раздробленная платина [68].

Микрокапли (туман) размером 1,5–2 мкм, образующиеся при конденсации насыщенного пара в результате быстрого расширения, эффективно подавляют взрывные явления в бедных смесях водорода с воздухом. Концентрационные границы быстрых режимов горения, перехода горения в детонацию и пределы детонации расширяются в сторону более бедных смесей при увеличении масштабов [69].

Величина нижнего концентрационного предела (НКП) водородо-воздушных смесей: 4 % H<sub>2</sub> при зажигании снизу, когда водород горит отдельными малыми всплывающими очажками за счет диффузии и много его остается непрореагировавшего; и несколько менее определенная – 9% H<sub>2</sub> – при зажигании сверху, когда пламя распространяется сплошным фронтом. Влияние давления на предельные концентрации существенно зависит от состава разбавителя. Если разбавителем являются N<sub>2</sub>, He, CO<sub>2</sub>, НКП растет с давлением. Если разбавителем является H<sub>2</sub>O, НКП при малом содержании пара растет с давлением, а при большом ведет себя немонотонно – растет при низких давлениях и убывает при высоких давлениях. Стенки нагретого сосуда, который обычно изготавливают из нержавеющей стали, при повышении температуры действуют как катализатор химической реакции, уменьшая количество водорода в смеси. При определении пределов в вертикальной стеклянной трубе, нагретой выше 200 °С, такого эффекта не наблюдали. Энергия зажигания увеличивается с ростом интенсивности турбулентности [69].

#### **14. Характеристики пероксида водорода**

Согласно [47] концентрированные растворы пероксида водорода (> 65 мас. %) разогреваются при разложении с образованием воды и кислорода. Существует опасность взрыва сильно концентрированных растворов (> 75 мас. %) или чистого соединения при действии тепла, механического удара или катализаторов разложения (металлы и их соли). Возможно взрывное разрушение герметичных контейнеров в условиях постепенного разложения. При реакциях с органическими материалами могут происходить взрывы.

## 15. Характеристики окислителей и восстановителей

Азотная кислота ( $\text{HNO}_3$ ) при контакте со многими горючими материалами вызывает их самовозгорание [31].

В [47] сообщается, что для тетраоксида азота установлена предельная концентрация 5 ppm (9 мг/м<sup>3</sup>), для краткосрочного воздействия (15 мин) рекомендуется порог 1 ppm (1,8 мг/м<sup>3</sup>).

Азотистоводородная кислота ( $\text{HN}_3$ ) – взрывоопасная жидкость с резким запахом. Температура кипения – 37 °С. Ядовита, весьма чувствительна к механическим воздействиям и нагреванию, легко детонирует при нагревании или очень слабом ударе и трении. При взрыве разлагается на водород и азот, теплота взрыва 6 661 кДж/кг; объем газообразных продуктов взрыва 1 042 л/кг. В парообразном состоянии также легко взрывается от внешних воздействий. Соли азотистоводородной кислоты – азиды в подавляющем большинстве взрывчатые вещества [31].

Согласно [47] нижний порог взрывоопасной концентрации  $\text{HN}_3$  равен 4,7 моль/л; взрывоопасная температура для азида серебра > 250 °С, для азиды натрия > 300 °С.

Аммиак ( $\text{NH}_3$ ) горючий бесцветный газ. Растворимость в воде 34,2 % (масс.). Температура самовоспламенения 650 °С, концентрационные пределы распространения пламени в воздухе 15–28 % (об.), в кислороде 13,5–79 % (об.); минимальная энергия зажигания 680 мДж; максимальное давление взрыва 588 кПа; минимальное взрывоопасное содержание кислорода – 16,2 % (об.); нормальная скорость распространения пламени 0,23 м/с при 150 °С [31].

Аммония нитрат, аммиачная селитра ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ) горючее и взрывоопасное вещество в виде порошка или гранул. В воде растворяется. Температура самовоспламенения 350 °С; нижний концентрационный предел распространения пламени 175 г/м<sup>3</sup>. При нагревании в замкнутом пространстве, когда продукты терморазложения свободно не удаляются, аммиачная селитра может при некоторых условиях взрываться, а например под воздействием сильных ударов (при инициировании взрывчатыми веществами). Аммиачная селитра, содержащая 0,3 % (масс.) хлор-иона, разлагается со взрывом при 230 °С [31].

В [70] приводятся следующие сведения о термической стойкости аммиачной селитры:

– установлено, что активность углеводородного компонента по отношению к селитре тем выше, чем меньше степень полимеризации

элементарных звеньев в макромолекуле (за исключением моно- и дисахаридов, которые существенно не отличаются по активности). Пропитка материалов тары битумными и т. п. композициями очень резко уменьшает их реакционную способность по отношению к селитре;

– установлено, что процесс самопроизвольного разложения аммиачной селитры является автокаталитическим. Агентами автокатализа является двуокись азота и в меньшей степени вода. Предложен механизм процесса самопроизвольного разложения аммиачной селитры, важной стадией которого является взаимодействие двуокиси азота с органическим компонентом системы. Промежуточные продукты этого взаимодействия (алкилнитраты или радикалы), по-видимому, реагируют с аммиачной селитрой, что приводит систему к самовоспламенению;

– установлено, что в результате предварительного подогрева термическая стойкость аммиачной селитры значительно понижается. Это понижение стойкости может продолжаться при дальнейшем хранении системы при невысокой температуре;

– все испытанные примеси можно разбить на 4 группы по признаку эффекта, достигаемого при введении этих примесей к селитре: а) активирующие систему (двуокись азота, азотная кислота, вода); б) инертные примеси – вещества, нерастворимые в воде, и пассивные по отношению к азотной кислоте и двуокиси азота (кварц, полисиликаты и т. п.); в) примеси, существенно пассивирующие систему только при высоком содержании их в смеси (многие растворимые в воде соли) и г) стабилизаторы системы (карбонаты щелочноземельных металлов и магнезия (5 % от веса селитры), хлориды, мочевины (0,05–0,1 %), уротропин и т. д.).

Гидразин ( $N_2H_4$ ) – легко воспламеняющаяся и взрывоопасная жидкость. Температура вспышки 40 °С; температура самовоспламенения 132 °С; концентрационные пределы распространения пламени 4,7–100 % (об.). Оксиды железа сильно катализируют процесс самовоспламенения гидразина, понижая температуру самовоспламенения до 23 °С. Гидразин очень реакционноспособен и весьма неустойчив; легко разлагается под влиянием катализаторов, а также при нагревании и воздействии излучений. Склонен к химическому самовозгоранию при контакте с оксидами некоторых металлов (Cu, Fe, Mn, Cr, Pb, Hg) или веществами с развитой поверхностью (уголь, асбест и др.) Пары гидразина, смешанные с разными разбавителями, способны распространять пламя при 104–135 °С в пределах следующих концентраций: при разбавлении азотом 38–100 % (об.), при разбавлении



водяным паром 30,9–100 % (об.). Нормальная скорость распространения пламени 0,94 м/с. Растворимость в воде неограниченная, температура кипения 113,5 °С [31].

В [47] отмечено, что растворы, содержащие  $N_2H_4$  в концентрации менее 40 мас. %, не имеют точки вспышки или точки воспламенения.

Гидразин-гидрат ( $N_2H_4H_2O$ ) – легковоспламеняющаяся жидкость, температура вспышки и температура воспламенения 59 °С, температура самовоспламенения 267 °С. Растворимость в воде неограниченная, температура кипения 120 °С [31].

В [34] сообщается, что газовыделение в азотнокислых растворах, содержащих даже небольшое количество восстановителя (гидразин, щавелевую кислоту и др.), начинается внезапно и идет с большой скоростью, в том числе при операции смешивания компонентов; на критические температуры перехода окислительно-восстановительных реакций в растворах в режим взрыва и интенсивность газовыделения сильное влияние оказывают катализаторы, в роли которых могут выступать примеси.

## **16. Характеристики экстрагентов, сорбентов, смесей окислителей и восстановителей**

Специфика пожаровзрывоопасных характеристик технологических сред, содержащих экстрагенты, сорбенты, смеси окислителей и восстановителей, применяемых на радиохимических производствах, наиболее полно представлена в монографии [34].

В ней рассмотрены влияние концентрации азотной кислоты, условия изменения температуры и давления, влияние облучения на термическую стабильность экстракционных и сорбционных систем, азотнокислых растворов восстановителей, условия возникновения в них теплового взрыва и детонации.

На основании полученных экспериментальных данных авторы [34] установили, что:

– для экстракционных систем пожарная опасность определяется наиболее летучим компонентом (в основном разбавителем), поэтому все факторы, способствующие образованию в смесях легколетучих продуктов, приводят к повышению пожарной опасности экстрагентов;

– наличие воды (в том числе водных растворов азотной кислоты), растворенной или в виде отдельной фазы, слабо влияет на пожарную опасность экстрагентов;

– при нагревании экстрагентов, бывших в контакте с азотной кислотой, до температур выше 120–130 °С возможны экзотермические процессы, сопровождающиеся интенсивным выделением пены и газов;

– при нагревании экстракционных смесей до высоких температур, помимо образования горючих паровоздушных смесей, не исключено образование горючих смесей газообразных продуктов окисления с воздухом и пиролиза экстрагента;

– условия возникновения экзотермических процессов окисления и развития их в режиме теплового взрыва в смесях экстрагента с азотной кислотой обеспечиваются в результате нагревания смесей до стартовой температуры при давлении выше атмосферного (в закрытых аппаратах или при недостаточной пропускной способности сдувок открытых аппаратов);

– минимальная величина стартовой температуры, определенная экспериментально, в условиях, близких к адиабатическим, составляет 112–115 °С;

– в закрытых аппаратах тепловые взрывы возможны в двухфазной смеси экстрагента с азотной кислотой при концентрации 3 моль/л и выше; с увеличением концентрации азотной кислоты возрастает интенсивность теплового взрыва;

– тепловые взрывы могут возникать при наличии тонких слоев (0,3–0,5 см) органики (экстрагента, продуктов его превращения и радиолиза) над азотнокислым раствором;

– уранилнитрат является эффективным окислителем экстрагента и разбавителей. Стартовая температура теплового взрыва смесей с уранилнитратом составляет 160–170 °С, в присутствии азотной кислоты она снижается до 140 °С;

– при температуре ниже 120–130 °С уранилнитрат не проявляет окисляющего действия на органические компоненты экстракционных смесей;

– радиолиз экстракционных смесей приводит к заметному снижению их термической стабильности экстракционных систем, к снижению температур, при которых возникают процессы окисления, к повышению пожарной опасности за счет образования легколетучих продуктов; этот эффект уменьшается, если радиолиз происходит в присутствии азотной кислоты;

– содовые промывки облученных экстрагентов снижают их пожарную опасность до уровня свежих экстрагентов;

– в открытых сосудах при удалении водной фазы аниониты в нитратной форме или с нитратными комплексами металлов при нагревании способны к тепловому взрыву; катиониты в этих условиях окисляются с небольшим тепловыделением;

– в закрытых сосудах сухие или влажные аниониты в нитратной форме или в виде нитратных комплексов металлов, а также высушенные из растворов азотной кислоты, способны при нагревании к тепловому взрыву; катиониты в этих условиях обугливаются со слабым экзотермическим эффектом или без него;

– вследствие весьма низкой теплопроводности высушенных сорбционных смесей «критический диаметр» («критическая толщина слоя»), при котором может возникнуть тепловой взрыв, составляет всего 1–2 см;

– облучение существенно уменьшает термическую стойкость сорбционных смесей;

– достижение условий инициирования детонации в экстракционных и сорбционных системах в технологических операциях, осуществляемых на производстве, не представляется возможным.

#### ***2.3.4. Функциональные зависимости между показателями пожаровзрывоопасности веществ и материалов***

При использовании экспериментальных значений показателей пожаровзрывоопасности для нахождения безопасных условий эксплуатации ОЯТЦ необходимо принимать во внимание следующие обстоятельства:

– они обычно получены для модельных смесей, не содержащих радионуклиды;

– они обычно определены для стандартных условий;

– они определены для моделей малого масштаба.

Присутствие радионуклидов в технологических средах ОЯТЦ может существенно повлиять на изменение их пожаровзрывоопасности. К отличительным свойствам радиационно-технологических сред следует отнести:

– наличие дополнительного поражающего фактора (радиационного воздействия), который является основным признаком аварии на ОЯТЦ;

- наличие внутреннего источника энергии (радиоактивного распада)
- потенциального источника зажигания и инициирования взрыва;
- наличие внутреннего источника образования химически активных частиц (процессов радиолиза), включая образование пожаровзрывоопасных веществ и смесей;
- изменение значений показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов при наличии в них радионуклидов.

Это обстоятельство, а также необходимость использования для получения значений показателей пожаровзрывоопасности стандартных методик с применением образцов малого масштаба вызывают потребность в оценке степени их изменения при переходе к условиям осуществления технологических процессов на ОЯТЦ.

Таким образом, практическое использование значений показателей пожаровзрывоопасности, полученных по стандартным методикам, связано с необходимостью решения ряда проблем, основными из которых являются:

- идентификация границ режимов горения и взрыва радиационно-технологических сред ОЯТЦ по значениям показателей, полученным по стандартным методикам для модельных смесей;
- обоснование количества взаимосвязанных параметров пожаровзрывоопасности, необходимого и достаточного для установления ПБЭ для пожаровзрывоопасных технологических процессов ОЯТЦ.

Методической основой для решения данных проблем являются положения и выводы теории горения и взрыва, позволяющие выявить типы зависимостей, существующих между установленными показателями.

К перечню основных показателей, которые следует учитывать при нахождении границ безопасных условий осуществления технологических процессов ОЯТЦ относятся: температура самовоспламенения технологической среды, давление в аппарате, концентрационные пределы распространения пламени (соотношение компонентов в технологической среде), масштаб технологического процесса (масса загрузки, геометрия аппарата), размер частиц дисперсных компонентов в технологической среде, доза облучения технологической среды.

Базовой зависимостью для выявления взаимосвязи показателей пожаровзрывоопасности является диаграмма трех пределов воспламенения для газовых систем, представляемая в координатах давление – температура. Вид этой зависимости в общем виде показан на рис. 28 применительно к самовоспламенению реакционной смеси. Первому, второму и третьему пределам самовоспламенения на рис. 28 соответствуют участки линии:

$a - b$ ,  $b - c$ ,  $c - d$ . Справа от этой линии находится область самовоспламенения реакционной смеси.

В [29] показано, что рассмотренный вид зависимости можно отнести к различным режимам протекания реакции: воспламенения (зажигания), самовоспламенения, взрыва, и зависимости, соответствующие этим режимам, представляют собой в первом приближении серию параллельных линий. Вместе с тем в [29] отмечено, что вид этих зависимостей лишь приближенно повторяет друг друга.

Поскольку тепловому взрыву соответствует переход границы третьего предела, на рис. 28 показаны также линии, представляющие собой границы взрываемости и далее (если это возможно по энергетическим характеристикам) – границы перехода взрывчатого превращения в режим детонации.

Таким образом, в общем случае при увеличении температуры при данном давлении или давления при данной температуре, или при одновременном увеличении давления и температуры из состояния реакционной смеси, обозначенного точкой 1, может произойти последовательное самовоспламенение этой системы, возникновение теплового взрыва с последующей детонацией.

Нахождение области детонации внутри области взрываемости, а последней – внутри области самовоспламенения показано также на рис. 29. По оси ординат на рис. 29 приведен состав системы, состоящей из окислителя (О) и восстановителя (В) с указанием верхнего и нижнего концентрационных пределов самовоспламенения и границ взрываемости и детонации, а по оси абсцисс – содержание флегматизатора (инертного вещества) с указанием его минимальной флегматизирующей концентрации.

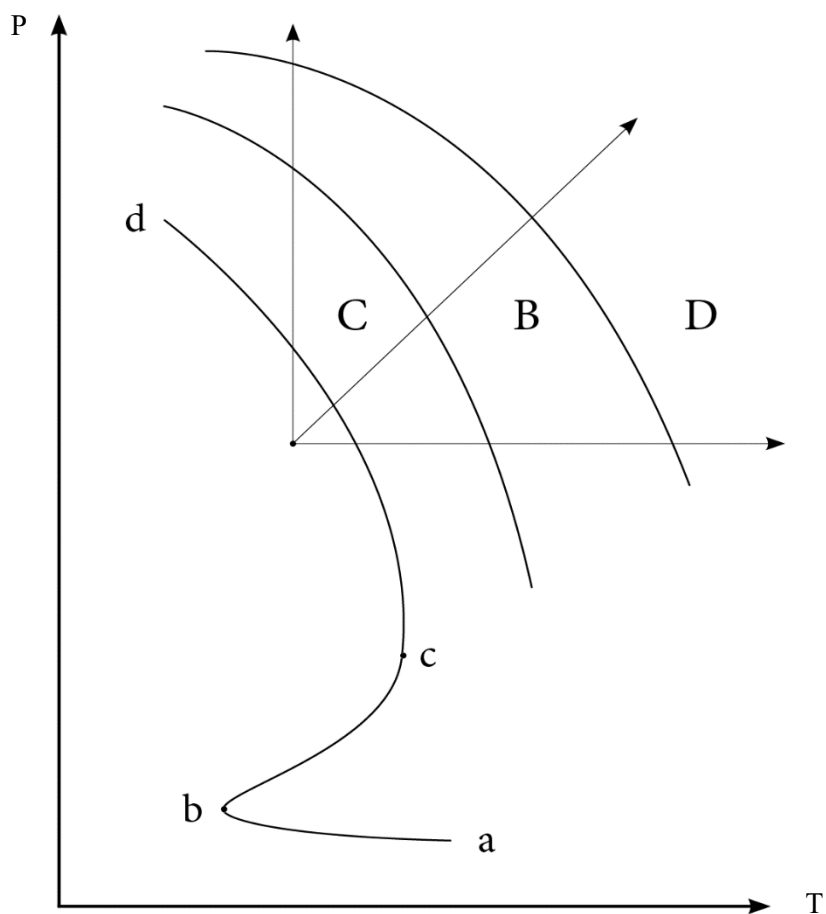


Рис. 28. P–T диаграмма с изображением взаимного расположения областей самовоспламенения, взрываемости и детонации

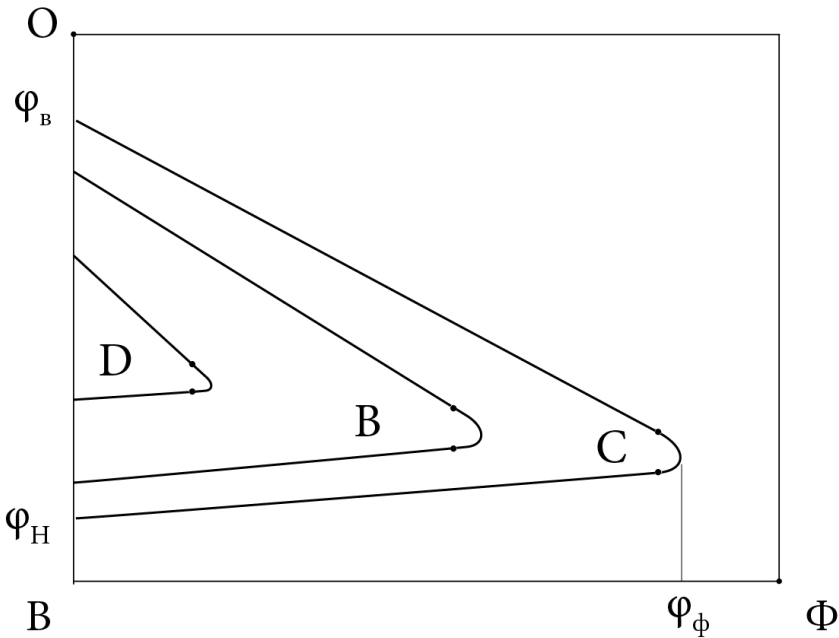


Рис. 29. Взаимное расположение областей самовоспламенения, взрываемости и детонации на диаграмме концентрационных пределов окислителя (O), восстановителя (B) и флегматизатора ( $\Phi$ )

Установленные типы зависимостей между приведенными выше показателями пожаровзрывоопасности показаны на рис. 30. Приведенные на рис. 30 области самовоспламенения реакционной системы заштрихованы.

Первый тип зависимости относится к трем пределам самовоспламенения, взрываемости и детонации.

Второй тип зависимости отражает характер изменения концентрационных пределов при изменении температуры и давления. Минимум на таких зависимостях соответствует оптимальному для протекания реакции составу реагентов (близкому к стехиометрическому количеству). При избыточном содержании окислителя или восстановителя температура самовоспламенения реакционной системы увеличивается.

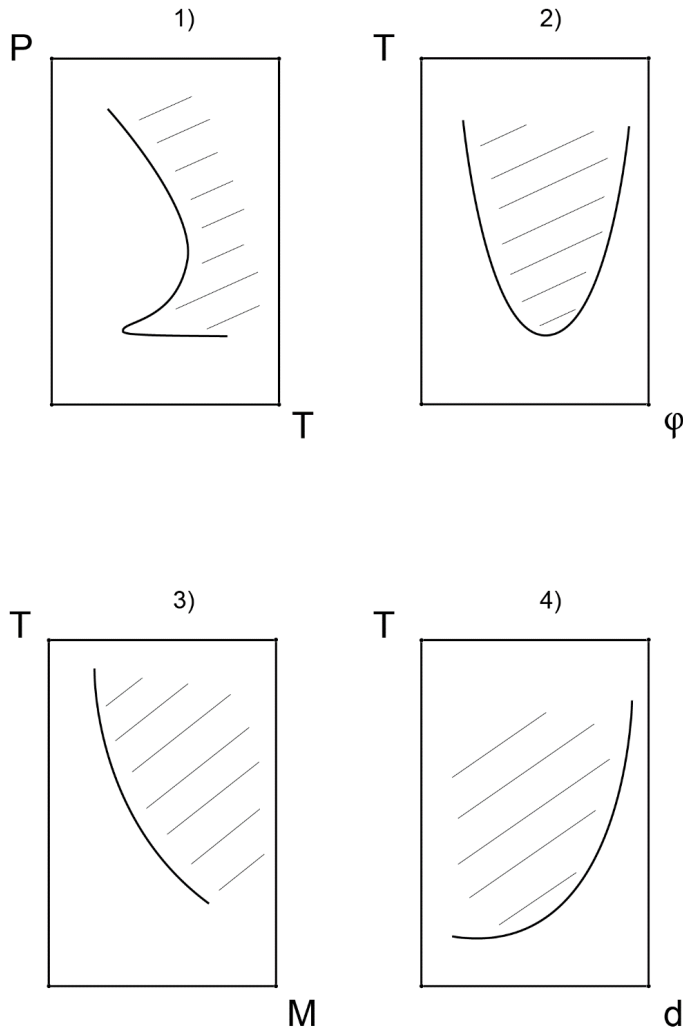


Рис. 30. Типы зависимостей границ самовоспламенения при изменении значений двух показателей пожаровзрывоопасности

Третий тип зависимости показан на примере снижения температуры самовоспламенения реакционной системы с увеличением масштаба осуществляемого процесса. Такой тип зависимости относится также к снижению значений температуры самовоспламенения при увеличении дозы облучения реакционной системы.



Четвертый тип зависимости показан на примере увеличения температуры самовоспламенения дисперсного материала с увеличением размера его частиц [72].

Поскольку границы областей самовоспламенения, взрываемости, детонации зависят одновременно от значений всех перечисленных показателей пожаровзрывоопасности, приведенные на рис. 30 типы зависимостей между парами параметров представлены применительно к фиксированным значениям всех остальных параметров.

Пример взаимосвязи трех параметров пожаровзрывоопасности (температуры самовоспламенения, давления, соотношения реагентов) при фиксированных значениях остальных показан на рис. 31.

На правом графике рис. 31 приведены кривые, относящиеся к трем пределам самовоспламенения, для различных соотношений реагентов, причем левая кривая соответствует их оптимальному соотношению.

На левом графике рис. 31 показано, как точки на кривых трех пределов соотносятся с границей области самовоспламенения, представленной в координатах давление – концентрация реагентов.

На нижнем графике рис. 31 представлена аналогичная зависимость в координатах температура самовоспламенения – концентрация реагентов.

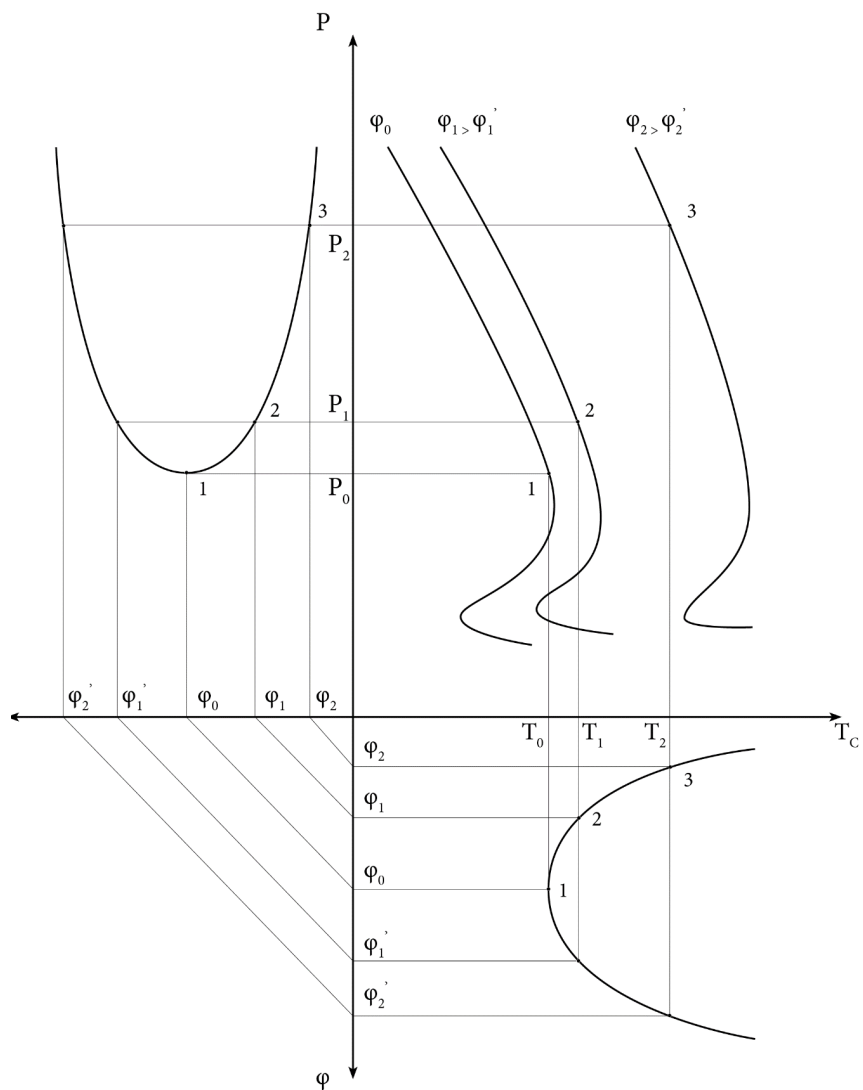


Рис. 31. Взаимосвязь между границами самовоспламенения при изменении значений трех показателей пожаровзрывоопасности

Согласно рис. 31 точка 1 соответствует минимальному значению температуры самовоспламенения  $T_0$  для оптимального соотношения реагентов (вырождению концентрационных пределов в точку). При этом минимальному значению температуры самовоспламенения и оптимальному соотношению реагентов будет соответствовать давление  $P_0$ . Снижение давления ниже этого значения (но выше границы второго предела) делает самовоспламенение реакционной смеси невозможным.

С увеличением давления (до  $P_1$  и  $P_2$ ) и температуры (до  $T_1$  и  $T_2$ ) происходят соответствующее увеличение диапазона между ВКП и НКП (точки 2 и 3 на рис. 30) и расширение области самовоспламенения реакционной смеси.

Пример взаимосвязи четырех параметров пожаровзрывоопасности (температуры самовоспламенения, давления, соотношения реагентов, масштаба процесса) при фиксированных значениях остальных показан на рис. 32.

В [29] отмечено, что с увеличением радиуса сосуда кривая трех пределов сдвигается в сторону меньших значений температур, а вершина полуострова самовозгорания опускается вниз в область меньших значений температуры и давления.

Такой характер зависимостей температур самовоспламенения реакционной смеси для двух значений соотношения реагентов и двух масштабов процесса (для аппаратов разных радиусов и, соответственно, для разной загрузки реагентов) показан на правом графике рис. 32.

Как следует из построений на рис. 32, увеличение масштаба процесса привело к снижению минимальной температуры самовоспламенения (с точки 3 до точки 1), уменьшению значения давления, при котором становится возможным самовоспламенение, и уменьшению значений температуры и давления, при которых достигается одинаковое для разных масштабов значение концентрационных пределов (точки 4 и 2 на рис. 32).

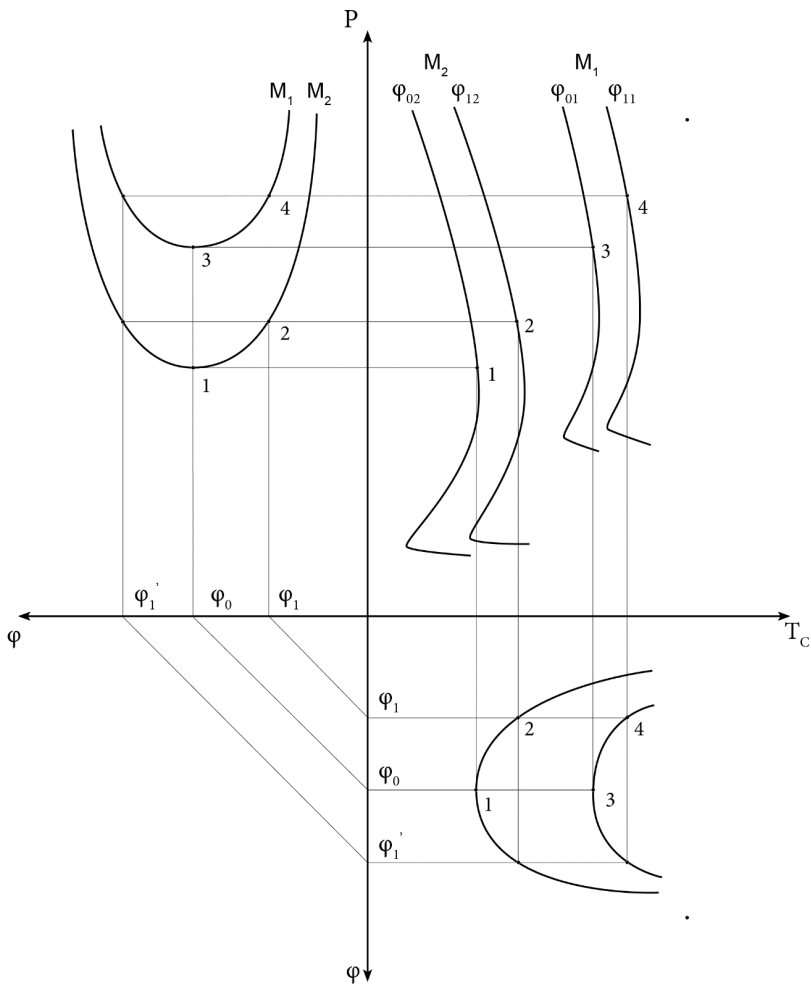


Рис. 32. Взаимосвязь между границами самовоспламенения при изменении значений четырех показателей пожаровзрывоопасности

### 2.3.5. Категории взрывоопасности

Степень взрывопожароопасности объекта защиты, включая ОЯТЦ, детализируется посредством установления категорий зданий, сооружений, помещений, технологических блоков, наружных установок и классов взрывоопасной зоны и зоны разрушения в нормативных документах по пожарной и промышленной безопасности. На рис. 33 представлена схема,

позволяющая в целом рассмотреть взаимосвязь градаций взрывоопасности на объектах защиты.

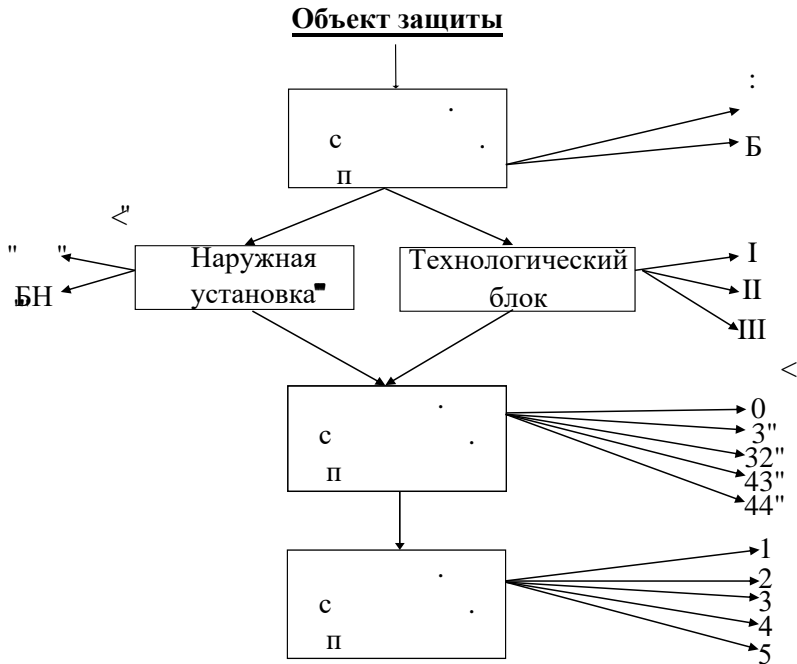


Рис. 33. Схема взаимосвязи категорий и классов взрывоопасности на объекте защиты

Согласно классификации зданий, сооружений и помещений по взрывопожароопасности [1], помещения производственного и складского назначения независимо от их функционального назначения подразделяются на следующие категории:

– к категории А (повышенной взрывопожароопасности) относятся помещения, в которых находятся (обрабатываются) горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки не более 28 °С в таком количестве, что могут образовать взрывоопасные парогазовые смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа, и (или) вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии

с водой, с кислородом воздуха или друг с другом, в таком количестве, что расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа;

– к категории Б (взрывопожароопасности) относятся помещения, в которых находятся (обращаются) горючие газы, легковоспламеняющиеся жидкости с температурой вспышки более 28 °С в таком количестве, что могут образовать взрывоопасные пылевоздушные или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа;

– здание относится к категории А, если в нем суммированная площадь помещений категории А превышает 5 % площади всех помещений или 200 м<sup>2</sup>;

– здание не относится к категории А, если суммированная площадь помещений категории А в здании не превышает 25 % суммированной площади всех размещенных в нем помещений (но не более 1 000 м<sup>2</sup>), и эти помещения оснащаются установками автоматического пожаротушения;

– здание относится к категории Б, если одновременно выполнены следующие условия: здание не относится к категории А и суммированная площадь помещений категорий А и Б превышает 5 % суммированной площади всех помещений или 200 м<sup>2</sup>.

При эксплуатации на объекте защиты (ОЯТЦ), в том числе внутри здания, сооружения, помещения, могут образовываться взрывоопасные зоны.

*«Пожароопасная (взрывоопасная) зона – часть замкнутого или открытого пространства, в пределах которого постоянно или периодически обращаются горючие вещества и в котором они могут находиться при нормальном режиме технологического процесса или его нарушении (аварии)» [1].*

Согласно классификации взрывоопасных зон, приведенной в [1]:

1) 0-й класс – зоны, в которых взрывоопасная смесь газов или паров жидкостей с воздухом присутствует постоянно или хотя бы в течение одного часа;

2) 1-й класс – зоны, в которых при нормальном режиме работы оборудования выделяемые горючие газы или пары легковоспламеняющихся жидкостей образуют с воздухом взрывоопасные смеси;

3) 2-й класс – зоны, в которых при нормальном режиме работы оборудования не образуются взрывоопасные смеси газов или паров жидкостей с воздухом, но возможно образование такой взрывоопасной смеси газов или паров жидкостей с воздухом только в результате аварии или повреждения технологического оборудования;

4) 20-й класс – зоны, в которых взрывоопасные смеси горючей пыли с воздухом имеют НКПВ менее  $65 \text{ г/м}^3$  и присутствуют постоянно;

5) 21-й класс – зоны, расположенные в помещениях, в которых при нормальном режиме работы оборудования выделяются переходящие во взвешенное состояние горючие пыли или волокна, способные образовывать с воздухом взрывоопасные смеси при концентрации  $65 \text{ г/м}^3$  и менее;

6) 22-й класс – зоны, расположенные в помещениях, в которых при нормальном режиме работы оборудования не образуются взрывоопасные смеси горючих пылей или волокон с воздухом при концентрации  $65 \text{ г/м}^3$  и менее, но возможно образование такой взрывоопасной смеси горючих пылей или волокон с воздухом только в результате аварии или повреждения технологического оборудования.

Методы определения классификационных показателей взрывоопасности зоны устанавливаются нормативными документами по пожарной безопасности [1].

На объекте защиты (ОЯТЦ) могут быть выделены взрывоопасные технологические блоки.

*«Технологический блок – аппарат или группа (с минимальным числом) аппаратов, которые в заданное время могут быть отключены (изолированы) от технологической системы (выведены из технологической схемы) без опасных изменений режима, приводящих к развитию аварии в смежной аппаратуре или системе» [2].*

По расчетным значениям относительных энергетических потенциалов  $Q_B$  и приведенной массе парогазовой среды  $m$  устанавливаются категории взрывоопасности технологических блоков [2]:

- I категория взрывоопасности:  $Q_B > 37, m > 5\ 000 \text{ кг}$ ;
- II категория взрывоопасности:  $Q_B 27 - 37, m 2\ 000 - 5\ 000 \text{ кг}$ ;
- III категория взрывоопасности:  $Q_B < 37, m < 2\ 000 \text{ кг}$ .

Категорию взрывоопасности блоков, определяемую расчетом, следует принимать на одну выше, если образующиеся в технологическом блоке опасные вещества относятся к токсичным, высокотоксичным веществам в соответствии с требованиями [50].

*«Категорирование технологических блоков по уровням взрывоопасности – градация технологических блоков по значениям относительных энергетических потенциалов и приведенным массам горючей парогазовой среды, которые могут выбрасываться в атмосферу при типичных авариях на технологических блоках и участвовать во взрыве парогазовых облаков, в замкнутых объемах технологических систем и производственных помещениях» [2].*

Согласно [1] по пожарной опасности наружные установки подразделяются на следующие категории, относящиеся к взрывопожароопасности:

- повышенная взрывопожароопасность (АН);
- взрывопожароопасность (БН).

В [1] приведена классификация зон разрушения (последствий взрыва):

- класс зоны разрушения 1 – полное разрушение зданий с массивными стенами ( $> 100$  кПа);
- класс зоны разрушения 2 – разрушение стен кирпичных зданий толщиной в 1,5 кирпича; перемещение цилиндрических резервуаров; разрушение трубопроводных эстакад (70 кПа);
- класс зоны разрушения 3 – разрушение перекрытий промышленных зданий; разрушение промышленных стальных несущих конструкций; деформации трубопроводных эстакад (28 кПа);
- класс зоны разрушения 4 – разрушение перегородок и кровли зданий; повреждение стальных конструкций каркасов, ферм (14 кПа);
- класс зоны разрушения 5 – граница зоны повреждения зданий; частичное повреждение остекления ( $\leq 2$  кПа).

Взрывопожароопасные помещения, наружные установки, взрывоопасные зоны и технологические блоки могут входить в состав ОЯТЦ в качестве его систем и элементов.

Взрывопожароопасность ОЯТЦ включает взрывопожароопасность систем нормальной эксплуатации, а взрывопожароопасность систем нормальной эксплуатации – взрывопожароопасность их элементов.

ОЯТЦ и систему нормальной эксплуатации можно считать взрывопожароопасными при наличии в них хотя бы одного взрывопожароопасного элемента.

К опасным и вредным (поражающим) факторам взрыва относят:

- барическое (ударно-волновое) воздействие;
- термическое воздействие;
- химическое воздействие;
- радиационное воздействие.

О степени взрывоопасности барического (ударно-волнового) воздействия можно получить представление исходя из перечня значений избыточных давлений, возникающих при взрывах.



В [2] приведена следующая классификация зон разрушения:

1. Полное разрушение зданий с массивными стенами: > 100 кПа;
2. Разрушение стен кирпичных зданий толщиной в 1,5 кирпича; перемещение цилиндрических резервуаров; разрушение трубопроводных эстакад: 70 кПа;
3. Разрушение перекрытий промышленных зданий; разрушение промышленных стальных несущих конструкций; деформации трубопроводных эстакад: 28 кПа;
4. Разрушение перегородок и кровли зданий; повреждение стальных каркасов, ферм: 14 кПа;
5. Граница зоны повреждения зданий; частичное повреждение остекления: < 2 кПа.

В [8] приведены следующие сведения о воздействии избыточного давления взрыва:

1. Сильные повреждения всех зданий: 100 кПа;
2. Средние повреждения зданий с массивными стенами, а также резервуаров, заполненных жидким топливом: 70 кПа;
3. Сильные повреждения промышленных зданий со стальным и железобетонным каркасом, разрушение кирпичных стен в полтора кирпича: 53 кПа;
4. Средние повреждения административных зданий и зданий с железобетонным каркасом, сильные повреждения кирпичных домов: 38 кПа;
5. Средние повреждения промышленных зданий и кирпичных домов, разрушение домов с деревянным каркасом, повреждение линий связи, электропередач: 28 кПа;
6. Разрушение шлакоблочных стен: 22 кПа;
7. Средние повреждения промышленных зданий, сильные повреждения домов с деревянным каркасом: 17 кПа;
8. Легкие повреждения заводских труб: 14 кПа;
9. Разрушение рам, дверей, перегородок, среднее повреждение домов с деревянным каркасом: 12 кПа;
10. Полное разрушение остекления: 0,035–0,007 кПа;
11. Частичное разрушение остекления: 0,015–0,020 кПа.

## 2.4. Аварийные взрывы на объекте ядерного топливного цикла

### 2.4.1. Понятие аварийного взрыва на объекте ядерного топливного цикла

Наибольшую опасность, связанную с деятельностью ОЯТЦ, представляют аварийные взрывы, то есть взрывы, последствия которых квалифицируют как происхождение аварии на ОЯТЦ. Поскольку в нормативных документах по обеспечению безопасности объектов ЯТЦ отсутствует определение аварийного взрыва на ОЯТЦ, для его идентификации в начале следует рассмотреть аналогичные понятия, употребляемые в промышленной безопасности.

#### 1. Понятие аварийного взрыва в системе промышленной безопасности

В разделе 1.1.2 «Классификация разновидности взрывов» приведено обобщенное определение аварийного взрыва как взрыва, произошедшего в результате нарушения технологии производства, ошибок обслуживающего персонала либо ошибок, допущенных при проектировании.

В данном определении отмечены основные причины возникновения аварийного взрыва. Исходя из этих причин можно заключить, что аварийный взрыв – это:

– неконтролируемый взрыв, возникающий при нарушении технологии производства; при соблюдении технологии производства возникновение взрыва исключается; потенциальная возможность возникновения взрыва при нарушении технологии производства при этом предусмотрена;

– случайный взрыв из-за ошибок персонала, в том числе и при осуществлении контролируемых взрывов; в отсутствие ошибок персонала и при соблюдении технологии производства взрыв или не произойдет, или будет контролируемым;

– непредусмотренный взрыв из-за ошибок, допущенных при проектировании, в том числе и в случае осуществления контролируемых взрывов; в отсутствие ошибок при проектировании и ошибок персонала при соблюдении технологии производства взрыв или не произойдет, или будет контролируемым.

Таким образом, согласно данному определению, любой взрыв (с учетом классификации типов взрывов, приведенной в разделе 1.1.2), произошедший по указанным причинам, является аварийным, то есть приводит к аварии или означает саму аварию.

Поэтому закономерно, что термин «взрыв» входит в определение аварии, сформулированное применительно к взрывоопасным производствам.

## 2. Взаимосвязь понятий аварии и аварийного взрыва в системе промышленной безопасности

В [2] рекомендуется использовать следующее определение термина «авария»: *«разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемый взрыв и (или) выброс опасных веществ».*

Согласно этому определению разрушение, взрыв, выброс представляют собой различные виды аварии. В данном определении, поскольку оно относится исключительно к взрывоопасности, отсутствует термин «пожар», который может сопровождать взрыв, хотя в [1] используется понятие «аварийный выход».

В рассматриваемом определении приведен существенный признак аварийного взрыва – это неконтролируемый взрыв на производственном объекте.

С учетом того, что разрушения и выброс опасных веществ способны происходить по ряду причин, в том числе в результате взрывов, из приведенного определения аварии можно выделить следующие последствия аварийного взрыва: это неконтролируемый взрыв, сопровождаемый разрушением сооружений, технических устройств и (или) выбросом опасных веществ.

Таким образом, на основании анализа рассмотренных определений аварийного взрыва и аварии можно сформулировать следующую обобщенную характеристику аварийного взрыва: это неконтролируемый взрыв на производственном объекте, произошедший в результате нарушения технологического процесса и (или) ошибок персонала и (или) ошибок в проектировании производственного объекта, который сопровождается разрушением оборудования и (или) сооружений производственного объекта и (или) выбросом опасных веществ.

Однако такая характеристика не содержит основной признак аварии на ОЯТЦ и, следовательно, аварийного взрыва, а именно радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду.

Таким образом, для того, чтобы идентифицировать аварийный взрыв на ОЯТЦ, требуется соответствующая корректировка данной характеристики с учетом существующего понятия аварии на ОЯТЦ.

### 3. Специфика понятия аварии на объекте ядерного топливного цикла

Определение аварии на ОЯТЦ приведено в [38]: *«авария на объекте ядерного топливного цикла – нарушение эксплуатации объекта ядерного топливного цикла (далее – ЯТЦ), при котором произошел выход ядерных материалов, радиоактивных веществ и (или) ионизирующего излучения за предусмотренные проектом объекта ЯТЦ для нормальной эксплуатации границы в количествах, превышающих установленные пределы безопасной эксплуатации. Авария характеризуется исходным событием, путями протекания и последствиями».*

Если исходить из комментария [75], *«такое определение аварии...принято потому, что здесь радиоактивные вещества и ионизирующие излучения...являются специфической особенностью ...и представляют собой основной вид опасности для персонала, населения и окружающей среды и требуют специальных мер защиты в силу характера распространения и возможных масштабов этой опасности. Другие виды опасности, обычные для большинства производственных предприятий...тоже существуют. Однако, они рассматриваются не как самостоятельная опасность, а лишь в качестве исходных событий радиационных аварий при разработке мер по защите от основного вида опасности, либо защита от них регламентируется другими правилами... где такие события не могут иметь радиационных последствий».*

Следует подчеркнуть, что установление приоритета ядерной безопасности применительно к ЯУ является одним из основных пунктов соблюдения принятой Российской Федерацией международной «Конвенции о ядерной безопасности» [76].

Приведенное определение аварии на ОЯТЦ включает следующие составляющие:

- 1) нарушение эксплуатации;

- 2) выход ионизирующего излучения (ИИ), ядерных материалов (ЯМ), радиоактивных веществ (РВ) за предусмотренные границы;
- 3) границы предусмотрены проектом ОЯТЦ;
- 4) границы предусмотрены для нормальной эксплуатации;
- 5) количественный выход ИИ (ЯМ, РВ) превышает ПБЭ;
- 6) ПБЭ установлены.

Первая составляющая определения аварии на ОЯТЦ включает в себя понятие эксплуатации ОЯТЦ. В [38] дано следующее определение: *«эксплуатация объекта ЯТЦ – деятельность, направленная на достижение безопасным образом целей, для которых предназначен объект ЯТЦ».*

Такое определение допускает широкое толкование деятельности для обеспечения целей предназначения ОЯТЦ как совокупности всех видов деятельности, относящихся к жизненному циклу объекта: от проектирования до вывода из эксплуатации. И все эти виды деятельности должны обеспечивать цели предназначения ОЯТЦ безопасным образом.

В этом случае к нарушениям эксплуатации могут относиться и нарушения, допущенные при проектировании, и нарушения безопасной эксплуатации, допущенные при обращении с технологической средой на всех этапах производственной деятельности ОЯТЦ.

Термин «выход» (вторая составляющая) является обобщающим и применим как для вещества (материала), причем в любом агрегатном состоянии, так и для излучения. При этом допускаются случаи, когда выход ИИ из ОЯТЦ может происходить без выхода ЯМ и РВ.

Разновидностями термина «выход» являются термины «выброс», «сброс», а также «утечка».

Согласно определению, приведенному в [5], выброс *«поступление вещества (смеси веществ) в газообразном и (или) аэрозольном состоянии в окружающую среду (атмосферу) из источника выбросов».*

Термин «сброс» используется в [38] применительно к поступлению вещества в жидком состоянии: *«не допускать неконтролируемые сбросы радиоактивных веществ в водные объекты, водоносные горизонты, ямы, колодцы, скважины на поверхность земли, а также в системы хозяйственно-фекальной и производственно-ливневой канализации».*

В [38] приведено следующее значение термина «утечка»: *«количественной характеристикой не герметичности является величина утечки (проектная, фактическая) – количество среды, вышедшей из*

контролируемого объема при определенных параметрах в единицу времени».

Что касается границ выхода ИИ, то они могут быть поняты в двух значениях: как пространственные координаты вокруг ОЯТЦ (границы площадки) и как значения эксплуатационных параметров. В контексте всего определения к пространственным координатам относится термин «выход», то есть выход ИИ с ОЯТЦ, а термин «границы» имеет значение границ нормальной эксплуатации, то есть, согласно определению нормальной эксплуатации [38] – значение эксплуатационных пределов. Это соотносится и с определением эксплуатационных пределов [38] как граничных значений параметров и характеристик состояния систем (элементов) ОЯТЦ, заданных в проекте для нормальной эксплуатации. Об этом свидетельствуют и составляющие 3 и 4 определения аварии.

Пятая составляющая определения представляет собой критерий, по которому можно определить: произошла авария или нет. При этом предельное количество ИИ определяется установленными значениями характеристик ИИ, которые, в соответствии с [38], должны быть приведены в проекте ОЯТЦ.

Также следует учитывать, что, согласно комментариям [75], нарушение ПБЭ приводит к предаварийным ситуациям и аварии, причем нарушение ПБЭ по контролируемому параметру приводит к предаварийной ситуации, а недопустимое для нормальной эксплуатации повреждение барьера с выходом активности – к аварии.

Таким образом, авария на ОЯТЦ определяется количественным выходом из ОЯТЦ ЯМ, РВ, ИИ сверх установленных значений.

#### 4. Применение термина «взрыв» в системе ядерной и радиационной безопасности

Возможные вариации использования термина «взрыв» на ОЯТЦ можно выявить, например, при рассмотрении отчета Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) по безопасности ЯТЦ [44].

В этом документе термин «взрыв» применяется в следующих значениях:

- внутренняя и внешняя опасность;
- фактор внутренней опасности;
- внутренний фактор опасности;

- фактор опасности взаимосвязанный с типом аварии;
- внутреннее событие;
- внутреннее событие физико-химического характера;
- аварийное происшествие;
- категория инцидента;
- физико-химический процесс.

Кроме того, в [44] термин «взрыв» употребляется в приведенных системах классификации ядерных происшествий и аварий, основанных на делении аварий по категориям и уровням, а авария на ОЯТЦ трактуется как событие, не относящееся к промышленной аварии или другим событиям, находящимся «вне шкалы» приведенных систем классификации.

Приведенные выше значения термина «взрыв» можно сгруппировать в два понятия: опасность (его обстоятельство, фактор) и аварийное событие (происшествие, инцидент, процесс), которые представляют собой разные аспекты характеристики аварии.

Оба понятия являются взаимосвязанными: опасность определяется возможностью возникновения взрыва, а аварийное событие обусловлено реализацией этой опасности.

Вместе с тем в формулировке критерия пятого уровня аварии по Международной шкале ядерных событий (INES) взрыв с выходом ИИ рассматривается как один из видов аварии: *«Серьезное повреждение ядерного предприятия. Оно может включать серьезное повреждение активной зоны энергетического реактора, серьезную ядерную аварию или серьезный пожар, или взрыв с выходом большого количества радиоактивности в пределах установки»* [44].

В [44] сообщается, что шкала была разработана для АС, но ее применение также рекомендовано для классификации событий на установках ЯТЦ.

#### 5. Виды аварий на объекте ядерного топливного цикла

В соответствии с изложенным можно выделить следующую иерархию понятий:

- авария – общее понятие для обозначения ряда конкретных аварий;
- взрыв, пожар, выход ИИ – события конкретных аварий;
- разрушение, выброс, сброс, утечка, разгерметизация и др. – отличительные признаки конкретных аварий.

Конкретные виды аварий могут реализоваться в пределах протекания одной аварии. Из этого следует, что одна авария может характеризоваться спектром признаков, относящихся к разным конкретным авариям.

В то же время можно заключить, что в своем единстве аварийные события и их различные проявления (признаки): разрушение, взрыв, выброс опасных веществ, выход излучения, пожар представляют собой различные виды опасности. Они могут реализоваться самостоятельно или в различных сочетаниях в процессе протекания одной аварии. Так, пожар способен вызвать взрыв, взрыв привести к разрушению технического устройства, в результате может произойти выброс опасного вещества и выход ИИ и т. п.

Таким образом, суммарное событие (авария) может включать события, представляющие собой реализацию различных видов опасности. Однако для конкретных типов объектов один из видов опасности можно выделить в качестве определяющего. По отношению к нему другие виды представляют меньшую опасность, и их можно отнести к разряду дополнительных. Такому виду опасности соответствуют специфичные аварии и специализированная система регулирования безопасности. При этом другие системы регулирования безопасности должны выполнять роль дополнительных по отношению к ней.

Для ОЯТЦ к основному виду опасности относится недопустимый выход ЯМ, РВ, ИИ, приводящий к радиационному воздействию на работников (персонал) этих объектов, население и окружающую среду. Именно этот вид опасности определяет факт возникновения аварии на ОЯТЦ. Именно поэтому к аварии на ОЯТЦ не причисляют промышленные аварии, как это отмечено выше.

Отсюда следует, что в общем случае взрыв на ОЯТЦ не идентичен аварии на ОЯТЦ. Он может не сопровождаться соответствующим выходом ЯМ, РВ, ИИ (например, в случае взрыва баллона с инертным газом).

Таким образом, возникает потребность в установлении рамок использования термина «взрыв» применительно к ОЯТЦ.

Для более детального выявления сходства и различия в применении терминов «авария» и «взрыв» можно использовать следующую взаимосвязь понятий, относящихся к аварии на ОЯТЦ:

- характер опасности – радиационное воздействие;
- разновидности событий – ядерная авария, радиационная авария;



- показатели аварии – выход ЯМ, РВ, ИИ (выброс, сброс, утечка ЯМ, РВ);
- значения показателей – дозы облучения, нормативы выбросов и сбросов, содержание РВ в окружающей среде;
- критерий реализации – превышение значений параметров ПБЭ.

#### 6. Виды взрывов на объекте ядерного топливного цикла

С учетом того, что в результате взрыва на ОЯТЦ количество вышедших ЯМ, РВ, ИИ может как превышать, так и не достигать значения установленного для аварии предела – такой взрыв (принимая во внимание существующие системы взрывозащиты) можно квалифицировать как нарушение безопасной эксплуатации или в предельном случае как факт аварии на ОЯТЦ. В последнем случае аварийный взрыв на ОЯТЦ является одним из возможных видов аварии наряду с выбросом или сбросом РВ. Кроме того, следует учитывать то, что взрыв одной технологической системы, не относящийся к аварии, может представлять собой исходное событие для эскалации аварии для другой технологической системы ОЯТЦ.

Таким образом, можно выделить следующие виды взрыва, учитываемые при обеспечении безопасности ОЯТЦ:

- 1) вид аварии;
- 2) нарушение безопасной эксплуатации, не приводящее к аварии;
- 3) внешнее событие (по отношению к данному объекту), выполняющее роль исходного события аварии на ОЯТЦ.

В любом случае для потенциально взрывоопасных технологических процессов в проекте ОЯТЦ должны быть приведены ПБЭ.

Вне зависимости от вида взрыва на ОЯТЦ он характеризуется исходным событием, путями протекания и последствиями.

Потенциальная возможность возникновения взрыва должна быть предусмотрена в проекте ОЯТЦ для всех режимов его эксплуатации:

- ввода в эксплуатацию, в том числе после технического перевооружения, реконструкции, модернизации, капитального ремонта;
- опытной эксплуатации;
- промышленной эксплуатации;
- вывода из эксплуатации;
- при хранении реагентов, используемых на ОЯТЦ.

Следует также обратить внимание на то, что при взрыве может происходить выброс вещества не только в газообразном и аэрозольном, но

и в конденсированном состоянии, что не совсем согласуется с употребляемым значением данного термина в нормативных документах по ядерной и радиационной безопасности. Поэтому применительно к взрыву целесообразно применять обобщенный термин «выход» вещества.

### 7. Характеристика аварийного взрыва на ядерном топливном цикле

Исходя из изложенного, аварийный взрыв на ОЯТЦ имеет место только в том случае, если он сопровождается выходом ЯМ, РВ, ИИ в количестве, превышающем установленные ПБЭ. Если эти пределы не превышены, то взрыв на ОЯТЦ не является аварией (хотя и может относиться к промышленной аварии). Отсюда вытекает специфика понятия аварийного взрыва на ОЯТЦ:

- это вид аварии, характеризуемый выходом ЯМ, РВ в любом их агрегатном состоянии;
- он характеризуется уровнем и категорией аварии на ОЯТЦ;
- он относится к проектной или запроектной аварии на ОЯТЦ;
- он характеризуется дополнительными по отношению к аварии показателями (факторами) опасности, к которым относятся: разрушение, инициирование пожара;
- он характеризуется специфичными для аварии на ОЯТЦ эффектами: звуковыми, тепловыми, детонацией.

На основании анализа рассмотренных определений аварийного взрыва и аварии на ОЯТЦ можно сформулировать следующую обобщенную характеристику аварийного взрыва на ОЯТЦ: это неконтролируемый взрыв, произошедший в результате нарушения технологического процесса и (или) ошибок персонала, и (или) ошибок в проектировании, который сопровождается выходом ЯМ, РВ, ИИ в количестве, превышающем установленные ПБЭ, и может сопровождаться разрушением оборудования и (или) сооружений производственного объекта и (или) выходом опасных веществ.

Реализация предусмотренной в проекте потенциальной возможности возникновения взрыва относится к аварии проектной. Такой взрыв можно классифицировать как взрыв проектный (предусмотренный проектом) или взрыв проектной аварии.

Реализация условий возникновения взрыва не предусмотренных в проекте, может привести к нарушению безопасной эксплуатации ОЯТЦ, предаварийной ситуации (когда выход ЯМ, РВ и (или) ИИ произошел за предусмотренные проектом ЯТЦ для нормальной эксплуатации границы в количествах, не превышающих установленные ПБЭ), запроектной аварии

(когда выход ЯМ, РВ и (или) ИИ произошел в количествах, превышающих установленные проектные пределы). Такие взрывы можно классифицировать как взрыв предаварийный (непредусмотренный проектом) и взрыв запроектный (непредусмотренный проектом) или взрыв, относящийся к предаварийной ситуации, и взрыв, относящийся к запроектной аварии.

Место взрыва в траектории аварии на ОЯТЦ показано на рис. 34.

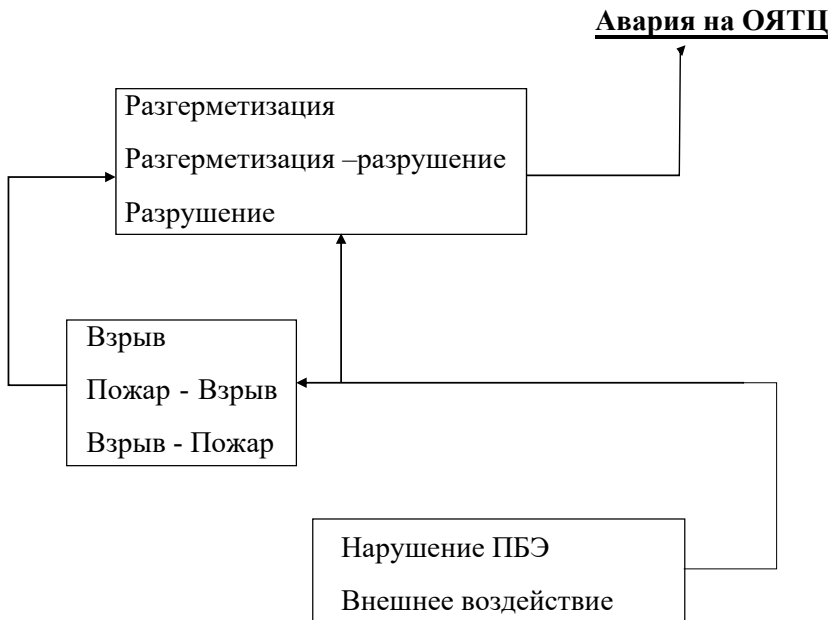


Рис. 34. Место взрыва в траектории аварии на объекте ядерного топливного цикла

#### 2.4.2. Понятие неуправляемой химической экзотермической реакции

Одной из основных причин возникновения аварийных взрывов на ОЯТЦ является протекание неуправляемых химических экзотермических реакций.

Неуправляемость таких реакций при осуществлении технологических процессов на ОЯТЦ обусловлена наличием в технологических средах широкого спектра содержащихся и непрерывно образующихся в них продуктов радиоактивного распада (например, для

отработавшего ядерного топлива с массовым числом радионуклидов от 70 до 160 [59]), среди которых могут содержаться примеси, способные даже в небольших количествах при определенных условиях инициировать самоускоряющиеся химические реакции с выделением газообразных продуктов, протекающие в режиме взрыва.

Неуправляемую химическую экзотермическую реакцию можно определить как совокупность химических превращений, протекающих в технологической среде ОЯТЦ, способных в определенных условиях приводить к возникновению горения и взрыва.

Применительно к осуществлению химико-технологических процессов можно выделить следующую специфику условий возникновения неуправляемых экзотермических реакций.

1) Исходная неуправляемость обусловлена первоначальным образованием химически активных промежуточных продуктов (радикалов), количество которых не фиксируется средствами контроля и управления процессом. При этом образование активных промежуточных продуктов связано с затратами энергии на разрыв химических связей молекул реакционной системы. Следовательно, их образование зависит от наличия радионуклидов в технологической системе и дозы облучения.

2) В течение определенного времени (индукционного периода) влияние побочного процесса на значение контролируемого параметра близко к проявлению «технологических шумов» или ниже пределов измерения. При этом происходит накопление химически активных промежуточных продуктов.

Анализ аварии на Сибирском химическом комбинате (СХК) в 1993 г. показал, что для данной аварии период индукции неуправляемой химической экзотермической реакции составлял около 3,5 ч [73]. Там же было отмечено, что для возникновения взрыва достаточно было достижения концентрации активных промежуточных продуктов значения 0,7 мол. %.

3) При достижении критического содержания в реакционной среде химически активных промежуточных продуктов процесс самоускоряется настолько сильно, что становится необратимым.

Значения параметров, при которых происходит взрыв, соответствуют условиям, при которых происходит превышение тепловыделения над теплоотводом из зоны реакции.

При аварии на СХК период ускорения реакции составлял 100–1 000 с [73], а время резкого ускорения перед взрывом составило 5–7 с.

В [47] отмечено, что реакции автокаталитического разложения нитрата гидросиламина протекают чрезвычайно быстро (менее 1 с).

4) В результате внезапного ускорения экзотермического процесса в ограниченном объеме образуются продукты с температурой выше их температуры кипения, то есть в виде сжатых газов, представляющих опасность.

Для идентификации протекания необратимой химической экзотермической реакции в ходе химико-технологического процесса необходимо выявлять признаки данного типа реакций.

В [74] приведены (на примере моделирования аварийного события на СХК) четыре возможных сценария протекания неконтролируемой реакции, характеризуемые своим типом изменения температуры во времени (рис. 35):

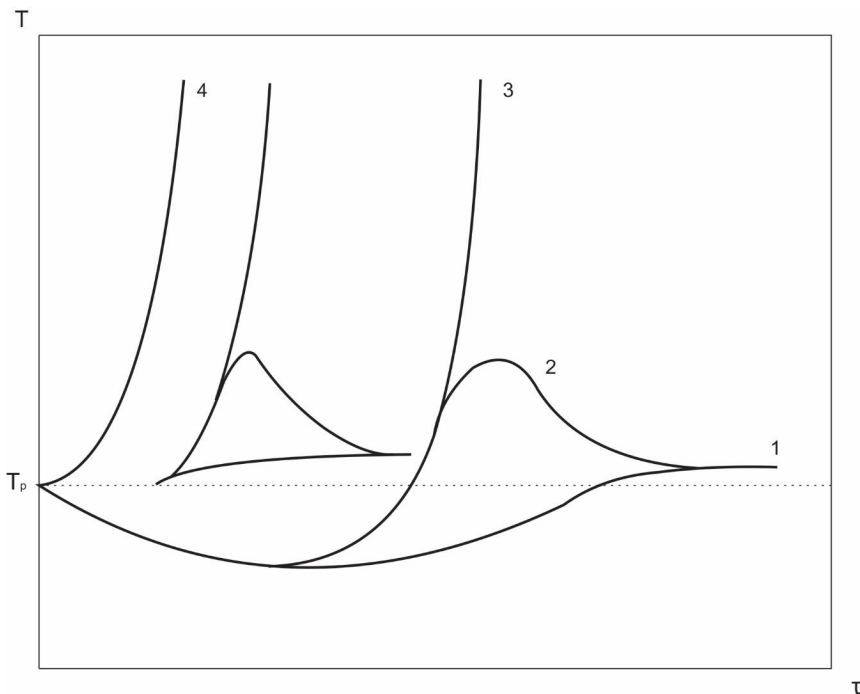


Рис. 35. Типы зависимостей контролируемой температуры технологического процесса от времени его проведения в случае протекания неуправляемой химической экзотермической реакции

1) «предотвращено-неконтролируемое» поведение системы – температура системы в течение индукционного периода несколько уменьшается, по сравнению с исходной, а затем плавно превышает исходную температуру и выходит на плато; этот вариант относится к саморегулированию системы;

2) «погашено-неконтролируемое» поведение системы – температура в начале несколько понижается, затем превышает исходное значение, проходит максимум и снижается до постоянного значения, несколько превышающего исходное значение; этот вариант допускает регулирование поведения технологической системы;

3) «задерживающееся-неконтролируемое» поведение системы – температура в начале несколько падает, затем неконтролируемо повышается до высоких значений; это вариант неуправляемого процесса с индукционным периодом;

4) «быстро неконтролируемое» поведение системы – температура сразу резко повышается от начальной температуры до неконтролируемых значений; это вариант неуправляемого процесса без индукционного периода.

В требованиях пп. 6.7.10, 6.7.12 [38] указаны способы предотвращения протекания неуправляемых химических экзотермических реакций. Не менее важное значение имеет прогнозирование их возникновения в химико-технологических процессах ОЯТЦ и установление показателей, детально характеризующих пожаровзрывоопасность неуправляемых химических экзотермических реакций.

Имеющиеся разработки по предотвращению опасности, связанной с протеканием неконтролируемых реакций, изложены в [74].

К ним относятся:

– использование данных реактивных тестов (то есть результатов экспериментального исследования термической устойчивости химической системы);

– определение и оценка худшего сценария, связанного с неконтролируемой реактивностью;

– оценка потенциальных последствий неконтролируемых реакций, а также создание безопасных проектов и основ эксплуатации и др.

Вместе с тем в [74] отмечено, что:

– ни один из существующих методов определения реакционных опасностей не подходит для всех обстоятельств;

– не существует стандартной процедуры для оценки опасностей химических реакций;

– существует не столь много рекомендаций о том, как систематически выявлять и оценивать наихудший сценарий с участием неконтролируемой реакции.

По-видимому, для анализа неуправляемых химических экзотермических реакций необходимо свое особое методологическое обоснование. Одним из методологических подходов в этом отношении может служить метод установления схемы цепного процесса, предложенный в [29]:

1) «на основе имеющихся экспериментальных данных устанавливаются типы конечных продуктов, а затем на основе знания конечных и исходных продуктов выявляются возможные типы активных промежуточных частиц»;

2) «зная исходные, промежуточные и конечные продукты, составляют схемы циклов, отмечая предполагаемые типы превращений, типы реакций гибели и реакций обрыва»;

3) «провести расчет пределов самовозгорания и периода индукции и показать, что следствия, вытекающие из предполагаемой цепной схемы, не только качественно, но и количественно согласуются с имеющимся материалом»;

4) «проверка должна производиться, во-первых, путем определения пределов возгорания на диаграмме полная концентрация газовой смеси – температура. Такая проверка может считаться, однако, только предварительной»;

5) «полученное на основе предполагаемой схемы уравнение пределов (на диаграмме полная концентрация газовой смеси – температура) должно быть проверено также на основе анализа пределов на диаграмме полная концентрация – парциальная концентрация горючего для постоянной температуры»;

6) «затем для того, чтобы проверить правильность той части схемы, которая учитывает роль отрицательного или положительного катализа на стенках, необходимо проверить результаты для смещения предела при изменении диаметра сосуда»;

7) «только в том случае, когда указанная всесторонняя проверка дает положительные результаты, можно считать, что предложенная схема действительно адекватна реальному развитию цепного процесса. В противном случае можно предложить десятки цепных схем,

*объясняющих ту или иную особенность развития процесса или тот или иной маленький участок кривой пределов. Даже для описания всех трех пределов на диаграмме  $C - T$  можно дать совершенно различные схемы. Однако по мере все более полного согласования теоретических результатов с опытом число возможных схем сокращается, и в конце концов остается наиболее вероятная схема доминирующего цепного процесса. При этом расчет цепного процесса необходимо проводить на основе строгих методов цепной диффузии».*

Только такая схема, по мнению автора [29], может рассматриваться как достоверная.

Рассмотренный подход подчеркивает существующую объективную сложность экспериментального или теоретического определений критериев, на основе которых можно было бы составлять обоснованные заключения о пожаровзрывоопасности технологических процессов ОЯТЦ, в которых возможно протекание неуправляемых химических экзотермических реакций, а также оценивать и минимизировать радиационную опасность последствий их протекания.

#### ***2.4.3. Специфика аварийных взрывов на объекте ядерного топливного цикла***

Взрывы на ОЯТЦ характеризуются рядом отличительных признаков, к основным, из которых можно отнести следующие:

- наличие дополнительного поражающего фактора (радиационного воздействия), который является основным фактором аварии на ОЯТЦ;
- наличие постоянно действующего внутреннего источника энергии (радиоактивного распада радионуклидов), который может служить источником зажигания и инициировать возникновение взрыва;
- наличие постоянно действующего источника образования пожаровзрывоопасных веществ и смесей (в результате процессов радиоллиза);
- ухудшение пожаровзрывоопасных показателей веществ и материалов при наличии в них радионуклидов (в том числе обуславливающее перевод жидкостей из разряда горючих в разряд легковоспламеняющихся жидкостей).

Эти отличительные признаки позволяют квалифицировать взрывы на ОЯТЦ как самостоятельный вид взрывов (аварии).



В [34] отмечены следующие особенности взрывов на РХП:

– наличие РВ и ЯМ в технологических системах РХП существенно повышает вероятность возникновения аварийных ситуаций и усугубляет последствия возможных аварий;

– радиолиз органических веществ и водных растворов приводит к выделению горючих газов, прежде всего водорода, и образованию продуктов с повышенной реакционной способностью по отношению к азотной кислоте и повышенной пожарной опасностью;

– теплота радиоактивного распада радионуклидов может вызвать неконтролируемый разогрев потенциально опасных смесей до температур, выше допустимых;

– РХП включает в себе и специфический вид опасности – радиационное воздействие на человека и окружающую среду. Наложение на поражающие факторы, присущие пожарам и взрывам, радиационных факторов, вызывает чрезвычайно тяжелые и долговременные последствия.

Специфика взрывов на ОЯТЦ определяется спецификой применяемых технологических сред. Технологическая среда такого объекта состоит из: ЯМ, РВ, химических веществ, в том числе опасных веществ, включая воспламеняющиеся газы, горючие жидкости, взрывоопасные вещества, взрывоопасные смеси, горючие вещества, горючие среды, окислители.

ЯМ и РВ могут находиться в технологической среде ОЯТЦ в виде взрывоопасных веществ, взрывоопасных смесей, воспламеняющихся газов, горючих веществ, горючих жидкостей, горючей среды, окислителей.

Технологическую среду можно классифицировать как радиационно-химическую технологическую среду.

Радиационно-химическая технологическая среда – ЯМ, РВ и химические вещества, находящиеся и перемещающиеся в технологической аппаратуре (технологической системе).

Взрыв таких радиационно-химических технологических сред представляет собой комплексную опасность, обусловленную такими факторами, как: механические разрушения, химическое воздействие отравляющих веществ и агрессивных сред, радиационное воздействие на работников (персонал), население и окружающую среду.

Наибольшую опасность при этом представляет ЯРБ.

ИИ изменяет показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов технологических сред ОЯТЦ. Влияние ИИ на показатели

пожаровзрывоопасности веществ и материалов технологических сред зависит от: вида ИИ, поглощенной дозы ИИ, способа облучения.

Особенности влияния гамма-излучения от внешнего источника ( $^{60}\text{Co}$ ) на показатели пожаровзрывоопасности экстракционных и сорбционных систем приведены в [34].

С увеличением дозы гамма-излучения:

- снижается температура начала газовыделения;
- повышается максимальная скорость газовыделения (для сорбционных систем, особенно при дозах облучения 80–100 Вт · ч /л);
- уменьшается продолжительность периода индукции;
- снижается температура начала экзотермических процессов («стартовая» температура теплового взрыва).

Специфика радиационного воздействия на технологические среды ОЯТЦ отмечена в [71]:

– при переработке водных растворов облученного ядерного топлива экстракционная система подвергается радиационному воздействию главным образом вследствие гамма- и бета-излучения продуктов деления урана;

– основной вклад в дозу, поглощенную экстрагентом, вносит излучение бета-активных элементов (70–85 %), остальной вклад в радиационную нагрузку за цикл обусловлен воздействием альфа-излучения актинидов, находящихся в органической фазе до их реэкстракции.

В [34] приведена следующая сравнительная характеристика значений показателей пожаровзрывоопасности для облученных и необлученных экстракционных и сорбционных смесей:

– в открытом сосуде температура начала газовыделения для смесей трибутилфосфата и его растворов в углеводородных разбавителях с азотной кислотой концентрации 12 моль/л составляет 80–90 °С, максимальная скорость газовыделения для необлученных смесей: 1,5 л/мин·л экстрагента, для облученных: 4 л/мин·л экстрагента;

– в открытых сосудах температура начала газовыделения для смесей сорбентов с азотной кислотой 7 и 12 моль/л при наличии раствора между гранулами сорбента составляет, соответственно, 70 и 60 °С, максимальная скорость газовыделения для необлученных смесей при температуре 100 °С: 0,8–1,2 л/мин·л сорбента, для облученных: 2,3–2,5 л/мин·л сорбента;

– для смесей трибутилфосфата и его растворов в углеводородных разбавителях с азотной кислотой концентрации 3–12 моль/л величины температур возникновения теплового взрыва составляют 125–140 °С для необлученных смесей и 110–120 °С для облученных смесей, удельный объем

газообразных продуктов теплового взрыва после завершения теплового взрыва: 1,5–2,0 м<sup>3</sup>/л экстрагента.

#### **2.4.4. Сведения об аварийных взрывах на объекте ядерного топливного цикла**

О степени взрывопожароопасности объектов РХП свидетельствует опыт их эксплуатации (рис. 36).

Уже на начальном этапе разработки технологий обращения с ЯМ специалисты столкнулись с необходимостью принятия мер по предотвращению взрывов. Так, 1 сентября 1944 г. в Ок-Риджской национальной лаборатории США при попытке прочистить трубу в лабораторном устройстве по обогащению урана с использованием гексафторида урана произошел взрыв. В результате взрыва разрушилась труба с водяным паром, что привело к гидролизу гексафторида урана и образованию фтористоводородной кислоты. Пять человек, находившихся в это время в лаборатории, пострадали от кислотных ожогов и вдыхания смеси радиоактивных и кислотных паров. Двое из них погибли, а остальные получили серьезные травмы.

По мере освоения промышленных технологий совершенствовались методы взрывозащиты при обращении с ЯМ и РВ, что привело к снижению вероятности возникновения взрывов на ОЯТЦ. На рис. 36 на примере экстракционных систем показана тенденция к сокращению аварийных взрывов на ОЯТЦ с течением времени. Однако полное исключение возможности возникновения аварийного взрыва представляется трудно выполнимой задачей.

В результате взрывов имели место крупные аварии (уровней 3–6 по 7-уровневой шкале ИНЕС), зафиксированы факты гибели людей и пострадавших от взрывов, случаи радиоактивного загрязнения окружающей среды.

В [59] отмечено, что аварии на предприятиях по переработке облученного ядерного топлива, связанные со взрывами, считаются одними из наиболее серьезных по своим последствиям.

К взрывопожароопасным ОЯТЦ, на которых имели место взрывы, относятся технологические системы, в которых осуществляют следующие технологические процессы [16, 44]:

- растворение отработавшего ядерного топлива;

- осветление растворов;
- отделение урана и плутония от других актинидов методом жидкостной экстракции;
- аффинаж плутония;
- упаривание растворов средней активности и высокоактивных растворов;
- денитрация плава уранилнитрата;
- приготовление гидразиннитрата;
- упаривание азотнокислых растворов, содержащих восстановители;
- использование гидразина в качестве восстановителя;
- сорбционное извлечение продуктов деления;
- электрохимическое и каталитическое восстановление урана;
- электролитическое растворение оксида плутония;
- спекание порошков оксидов урана и плутония в смеси водорода и аргона;
- обращение с порошками диоксида урана и металлического плутония;
- хранение высокоактивных жидких растворов, перлитных суспензий, отработавшего экстрагента.

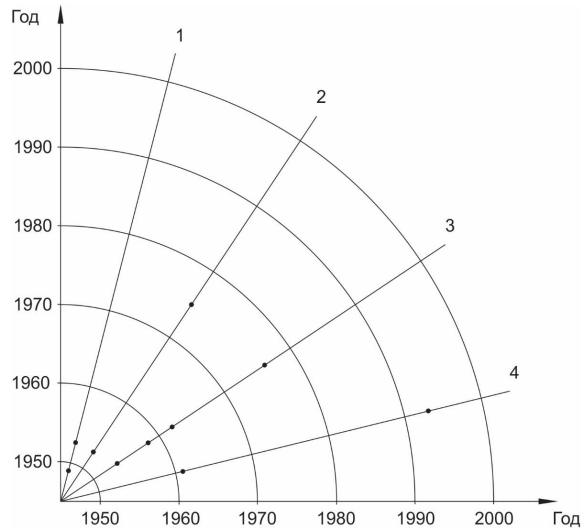


Рис. 36. Хронология крупных взрывов, связанных с экстракционными системами объекта ядерного топливного цикла.

1 – Ханфорд, 2 – Саванна-Ривер, 3 – ПО «Маяк», 4 – СХК

В [59] выделены следующие отдельные узлы технологических схем переработки облученного ядерного топлива, в которых вероятен не только пожар, но и взрыв:

- вскрытие и растворение топлива (измельченный порошок циркония, диспергированный в воздухе, возгорается при комнатной температуре, причем горение может принять взрывной характер; наблюдались случаи, когда увлажненные обрезки циркония, упакованные в бочки и хранившиеся под открытым небом, самовозгорались со взрывом);

- отмечены неоднократные аварии на установках США и во Франции, при которых анионообменная смола, нагруженная плутонием, взрывалась;

- отмечены аварии на предприятиях по переработке ядерного топлива, связанные с упаркой рафинатов и реэкстрактов урана, содержавших ТБФ, которые сопровождались взрывом и пожаром;

- радиолиз воды под действием излучения сопровождается выделением водорода со скоростью  $1 \text{ см}^3/(\text{Вт} \cdot \text{ч})$ ; герметичные сосуды могут взрываться просто по причине повышенного давления.

Оценить масштаб аварийных взрывов на ОЯТЦ можно при ознакомлении со следующими примерами.

Ряд аварийных взрывов произошел при обращении с плутонием в результате его самовозгорания или при сорбционном концентрировании из раствора на анионите.

Так, 11 декабря 1972 г. на предприятии г. Паулинг (США) по производству плутония произошли крупный пожар и два взрыва, в результате чего он был рассеян внутри и вне предприятия, что привело к закрытию завода.

17 июля 1993 г. на радиохимическом заводе ПО «Маяк» произошел взрыв в сорбционной колонне, который привел к ее разрушению, выбросу сорбента из колонны и повышению концентрации альфа-активных аэрозолей в аппаратном зале и на выходе вентиляционной трубы [77, 78].

Значительное количество крупных аварийных взрывов на ОЯТЦ было связано с образованием, накоплением и разложением так называемого «красного масла» в процессе экстракции и последующей денитрации реэкстрактов в выпарных аппаратах. Согласно [79] «*состав «красного масла» можно охарактеризовать как ТБФ с продуктами его разложения, насыщенный экстрагируемыми нитратами тяжелых металлов и  $\text{HNO}_3$  и выдержанный при повышенных температурах и воздействии ионизирующих излучений*».

В результате аварийных взрывов, связанных с «красным маслом» был нанесен следующий ущерб [79]:

– куб выпарного аппарата развалился на шесть основных частей, здание сильно повреждено (12.01.1953, Саванна Ривер, США);

– выпарной аппарат и часть здания разрушены; в результате выброса 0,6 г Pu загрязнены соседние здания, машины, дороги и участок местности площадью 16 000 м<sup>2</sup>; стоимость исправления повреждений – \$ 10 тыс. и работ по дезактивации – \$ 350 тыс. (20.11.1959, Ок-Ридж, США);

– разрушены выпарной аппарат и частично помещение, опорная колонна оторвалась, поднявшись вверх, пробила кровлю и упала (06.07.1980, Порт Хоуп, Канада).

Более подробно специфику аварийных взрывов на ОЯТЦ, связанных с «красным маслом», можно оценить при рассмотрении двух следующих примеров.

Врыв и пожар во время конверсии жидкого нитрата уранила в твердый оксид урана на заводе в Саванна-Ривере, США 12.02.1975 описаны в [44].

*«После 20 лет эксплуатации без серьезных происшествий на заводе произошла неконтролируемая реакция термического разложения комплекса трибутилфосфата с нитратом уранила, случайно попавшего в денитратор. В ходе реакции большая часть содержимого денитратора была выброшена из аппарата. Помещение было заполнено красно-коричневым NO<sub>2</sub>; парами и горючими газами от разложения трибутилфосфата. Газы воспламенились и вызвали взрыв и пожар, что привело к травмам двух работников (оба приступили к работе в тот же день после медицинского обследования, проведенного медицинским персоналом завода). Повреждение здания и оборудования также было небольшим.*

*Как только операторы приблизились к выходу, произошел взрыв, и ударной волной их обоих выбросило через двери. Один оператор получил умеренное раздражение легких вследствие вдыхания кислотных паров. Не было зафиксировано загрязнения кожного покрова, загрязнения носоглотки или поступления урана в организм. Измерения показали, что загрязнение было ограничено пределами здания.*

*Хотя одна стена была повреждена, несущие конструкции здания не пострадали. Потребовался ремонт стен, системы вентиляции помещений, элементов герметизации и освещения, а также покраска. Последствия от пожара были ограничены рабочей камерой. Прежде чем в августе 1975 г.*

была возобновлена нормальная эксплуатация, потребовалась очистка пола, подвесных трубопроводов, денитраторов и др.

По оценкам, энерговыделение составило около  $7 \cdot 10^5$  кКал. Расчетные условия, характеризующие ударную волну, составляют: температура 4 650–4 750 К и давление от 31 до 40 атм. Расчетные температуры соответствуют образованию пемзоподобного материала, который осел на конструкционных материалах и оборудовании, а расчетная ударная волна достаточна, чтобы разрушить стены. В соответствии с величиной полного энерговыделения его можно отнести к категории взрыва умеренной мощности.

Конкретный источник воспламенения не был установлен. Наиболее вероятной причиной, однако, являются реакции с участием свободных радикалов в газовой фазе».

Анализ аварии на Сибирском химическом комбинате в 1993 г. (4 уровень по шкале INES) проведен в [73].

«6 апреля 1993 г. на Сибирском химическом комбинате на заводе по переработке ядерного топлива в Томск-7 (ныне г. Северск) вблизи Томска, Россия произошел взрыв, который явился результатом химической реакции между концентрированной азотной кислотой и раствором органических материалов, используемых при переработке топлива. Органический раствор, который состоял в основном из три-н-бутилфосфата (ТБФ), неопределенного количества радиационно-деградированной органики, нитрированной органики, и растворителя – керосина, находился в виде слоя на поверхности водного раствора в корректирующей емкости объемом 34,1 м<sup>3</sup>. Водный раствор содержал в основном уранилнитрат и различные другие нитраты, в том числе нитрат плутония, и остаточных продуктов деления. Раствор готовился к переработке.

Впоследствии 1,5 м<sup>3</sup> концентрированной азотной кислоты было добавлено в емкость без перемешивания. Через примерно 2,5 часа раствор достиг температуры, при которой с большой скоростью была образована газовая смесь из органических испарений и пара. Давление в корректирующей емкости увеличилось, что привело к сильному разрушению емкости, выходу газов из ячейки, а также выходу газовой смеси «органика – кислота – пар» в галерею над емкостью.

В результате взрыва нанесен существенный вред отсеку над рабочим пространством, выбило 100-метровую неукрепленную стену, сильно повредило крышу, и начались небольшие пожары на крыше. В результате утечки радиоактивности было загрязнено около 200 км<sup>2</sup>

*окружающей территории, главным образом вдоль линии ветра, определенной метеорологическими условиями, существующими на тот момент».*

Самым крупным аварийным взрывом, произошедшим на ОЯТЦ, является взрыв в хранилище высокоактивных жидких РАО «ПО «Маяк» (6 уровень по шкале INES).

Авария на Южном Урале, 29.09.1957 г. описана в [44] следующим образом.

*«Авария произошла с раствором, который не используется в западной технологии типа PUREX, на начальном этапе развития советской военной промышленности (1945–1957 гг.). Установки, судя по описанию, не соответствовали западным стандартам, и растворы не соответствовали западным типам ЖВАО. Резервуар был заполнен высокоактивным раствором  $\text{HNO}_3$  и ацетата натрия и хранился с 1949 по 1957 г. (В действительности раствор нитрата и ацетата натрия содержал в основном короткоживущие продукты деления действующего радиохимического завода). Вследствие аварийного нарушения принудительного охлаждения на длительное время температура повысилась до  $350^\circ\text{C}$  и произошел взрыв смеси.*

*Приблизительно 74 ПБк (2 МКи) продуктов деления попало в атмосферу (для сравнения при чернобыльской аварии выброс составил 185 ЭБк (50 МКи) и было разнесено на расстояние от 100 до 300 км с поперечной шириной зоны заражения от 8 до 9 км. Центральная сильно загрязненная зона площадью 1 120 км<sup>2</sup> имела уровень концентрации активности от 74 ГБк до 3,7 ТБк. Внешняя доза гамма-облучения для людей, облученных за счет прямого облучения, составила от 7 до 170 мЗв, а эффективная доза, включая дозу за счет поступления с водой и пищей, составила от 23 до 520 мЗв.*

*Благодаря глубокой перепашке почвы (~50 см) уровень радиоактивности на поверхности был постепенно снижен до более низких значений. Не было отмечено никакого повышения уровня смертности по сравнению с цифрами, характерными для данной местности».*

Не обошлось без взрыва и при подземном захоронении жидких РАО. В 1977 г. в Доунрей (Великобритания) произошел взрыв в подземном хранилище жидких РАО на глубине 65 м, где скопилось более 1 000 т ЖРО (включая 4 кг Pu и 98,5 кг <sup>235</sup>U). В результате взрыва была сброшена 12-тонная защитная бетонная крышка и произошел значительный выброс радиоактивных материалов.



Сложность предотвращения аварийных взрывов на ОЯТЦ, подобных приведенным, заключается в недостаточном знании причин, по которым они произошли.

Так, авторы [80] по поводу аварийного взрыва, произошедшего в 1957 г. На «ПО «Маяк» пришли к заключению, что *«причину взрыва можно отнести к разряду «темных пятен» в области обеспечения ядерной безопасности. В то время не всегда учитывались условия возникновения критических масс в трубах и емкостях, особенно сложной конструкции, содержащих растворы делящихся материалов».*

Аналогичное мнение высказано авторами [79] по поводу аварийных взрывов, связанных с «красным маслом».

*«Все сведения о проблеме «красного масла» накопленные в течение 50 лет (с 1951 г.), свидетельствуют о том, что эта проблема далека до разрешения. Предпринятые до сих пор исследования показывают на только надводную часть айсберга. Слишком многое еще не изучено и не понято».*

## Часть 2. Система нормативного обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла

### Глава 1.

#### Понятие взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла

##### 1.1. Составная часть ядерной и радиационной безопасности

Для понимания специфики обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ предварительно требуется ознакомление с тем, что из себя представляет обеспечение безопасности ОЯТЦ в целом.

Вот, что об этом сообщается в ФНП [38]:

*– «безопасность объекта ЯТЦ – свойство объекта ЯТЦ при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии, ограничивать радиационное и другие возможные воздействия на работников (персонал), население и окружающую среду установленными пределами, а также предотвращать возникновение самоподдерживающейся цепной ядерной реакции деления (далее – СЦР) при обращении с ядерными материалами»;*

*– «основной целью обеспечения безопасности объекта ЯТЦ является защита работников (персонала), населения и окружающей среды от его радиационного воздействия»;*

*– «объект ЯТЦ удовлетворяет требованиям безопасности, если его радиационное воздействие на работников (персонал), население и окружающую среду при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии, не приводит к превышению установленных пределов доз облучения работников (персонала) и населения, нормативов выбросов и сбросов радиоактивных веществ, содержания радиоактивных веществ в окружающей среде, а также ограничивает это воздействие при запроектных авариях».*

Отсюда следует, что приоритетным направлением обеспечения безопасности ОЯТЦ, содержащих ЯМ и РВ, является соблюдение их ЯРБ. Это обусловлено тем, что радиационное воздействие от радиоактивных распадов ядер атомов и протекания ядерных реакций представляет наибольшую опасность с точки зрения наносимого ущерба и неотделимо от проявления других возможных видов опасности, сопровождающих деятельность ОЯТЦ, включая взрывы, поскольку во взрывоопасной технологической среде и продуктах взрыва содержатся РВ.

Таким образом, можно заключить, что в системе ЯРБ ОЯТЦ:

- воздействие типичных факторов взрыва на ОЯТЦ относится к «другим возможным воздействиям» (по отношению к радиационному) на работников (персонал), население и окружающую среду;
- безопасность ОЯТЦ связана с ограничением воздействия взрыва установленными пределами по выходу радиоактивных продуктов взрыва;
- ОЯТЦ удовлетворяет требованиям безопасности, если последствия произошедшего взрыва не приводят к превышению установленных пределов доз облучения работников (персонала) и населения, нормативов выбросов и сбросов РВ, содержания РВ в окружающей среде, а также если объект ограничивает последствия воздействия взрыва при запроектных авариях.

Итак, из приведенного выше следует, что поскольку приоритетным направлением обеспечения безопасности ОЯТЦ является обеспечение ЯРБ, обеспечение взрывобезопасности технологических процессов с участием радиационно-химических сред представляет собой не самостоятельный вид безопасности ОЯТЦ, а составную часть его ЯРБ.

В соответствии с рассмотренной иерархией потенциальных опасностей, исходящих от ОЯТЦ, можно заключить, что необходимым условием обеспечения безопасности ОЯТЦ является обеспечение его ЯРБ, но для того, чтобы она была обеспечена, необходимо соответствующее обеспечение других видов безопасности: пожарной, промышленной. Здесь имеет место причинно-следственная связь: если не будет обеспечена соответствующая пожарная и промышленная безопасность ОЯТЦ, то автоматически не будет обеспечена его ЯРБ, а, следовательно, и безопасность ОЯТЦ в целом.

Аналогичным образом обстоит дело с ПБЭ ОЯТЦ: для того, чтобы не были превышены ПБЭ по распространению ИИ за границы, установленные проектом ОЯТЦ, необходимо, чтобы не были превышены ПБЭ по значениям технологических параметров, в том числе определяющих условия возникновения взрыва на ОЯТЦ.

При этом необходимо отметить, что предотвращение взрывопожароопасности относится к наиболее значимому направлению обеспечения ЯРБ ОЯТЦ вследствие наибольшей степени опасности радиационного воздействия в результате взрыва, по сравнению с другими событиями аварий, потенциально возможных на этих объектах.

## **1.2. Принадлежность к пожарной и промышленной безопасности**

Взрывобезопасность ОЯТЦ является не только составной частью ЯРБ ОЯТЦ, но и по принадлежности непосредственно относится к соответствующим составным частям промышленной и пожарной безопасности.

Это обусловлено спецификой технических средств и организационных мер, применяемых для предотвращения взрывов, а также предотвращения и ликвидации пожаров, в результате которых возможно возникновение взрывов.

Кроме того, на территории ОЯТЦ могут происходить взрывы, не связанные с выходом РВ, например, взрывы баллонов с газом, а также взрывы, сопровождающие возгорание объектов, не содержащих радионуклиды, например, складских помещений с химическими реактивами.

С учетом того, что на ОЯТЦ используют взрывоопасные среды и взрывоопасные объекты (сосуды под давлением), предотвращение взрывоопасности на ОЯТЦ является также составной частью обеспечения промышленной (технической) безопасности.

На основании того, что вопросы, относящиеся к взрывопожароопасности объектов и пожаровзрывоопасности веществ и материалов, принадлежат к области пожарной безопасности – предотвращение взрывопожароопасности ОЯТЦ является также составной частью обеспечения пожарной безопасности.

При этом некоторые средства предотвращения взрывобезопасности объектов, применяемые для обеспечения пожарной и промышленной безопасности, необходимо использовать для обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ в обязательном порядке, некоторые целесообразно применять, а некоторые неприменимы для ОЯТЦ.

Например, к типичным мерам обеспечения взрывобезопасности производства относятся [81]:

- предохранительные конструкции;
- сигнализация о накоплении взрывоопасных газов и паров;
- исключение источников воспламенения;
- флегматизация и вентиляция;
- устройство огнепреградителей;
- взрывоподавление.

Очевидно, что не все перечисленные меры пригодны для применения на ОЯТЦ. Так, применение легко сбрасываемых конструкций приведет к выбросу РВ и радиоактивному загрязнению окружающей среды.

С учетом рассмотренных особенностей для определения понятия взрывобезопасности ОЯТЦ целесообразно рассмотреть формулировки аналогичных понятий, применяемых в сфере обеспечения пожарной и промышленной безопасности.

В действующих нормативных документах по обеспечению безопасности объектов используется термин «пожарная безопасность».

Согласно [1] пожарная безопасность объекта защиты – состояние объекта защиты, характеризуемое возможностью предотвращения возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара.

Отсутствие в [1] понятия «взрывопожаробезопасность объекта защиты» можно предположительно объяснить следующими обстоятельствами: пожарная безопасность связана с возможностью потушить пожар; взрыв, если он возник, не представляется возможным остановить (взрыв – необратимый процесс, подавить его можно только на начальной стадии развития при сверхбыстром обнаружении очага взрыва с помощью индикатора давления [81]). С этой точки зрения, взрывобезопасность объекта не может быть обеспечена, но может быть обеспечена взрывозащита объекта.

С другой стороны, возникновение взрыва можно предотвратить. В этом смысле допустимо использовать термин «взрывобезопасность» объекта.

Так, в [2] используются термины: «взрывобезопасность» – применительно к производствам и технологическим процессам; «взрывопожаробезопасность технологической системы».

В [49] дано следующее определение: взрывобезопасность – состояние производственного процесса, при котором исключается возможность взрыва, или, в случае его возникновения, предотвращается воздействие на людей опасных и вредных факторов, вызываемых взрывом, и обеспечивается сохранение материальных ценностей.

В [82] отмечено, что вся современная техника безопасности основывается на трех принципах предотвращения взрывов газовых систем.

Согласно [82] первый важнейший принцип, лежащий в основе наиболее радикальных решений задачи, предусматривает исключение

возможности образования горючих систем. Он охватывает такие методы, как предотвращение утечек газа и его движение в непредусмотренном регламентом направлениях, контроль за газовыми потоками, а также правильное регулирование состава в тех случаях, когда смешение горючего и окислителя, способных образовывать взрывчатую смесь, являются частью технологического процесса.

В ряде случаев взрывобезопасность производства не может быть гарантирована в рамках реализации первого принципа, например, при невозможности полностью исключить утечки и погрешности дозировки либо в случае необходимости перерабатывать заведомо взрывчатые газовые среды. При этом используется комплекс мероприятий для обеспечения взрывобезопасности на основе второго принципа: предотвращения возникновения импульсов, инициирующих горение, т. е. источников поджигания безусловно взрывчатых систем. Такие импульсы, помимо открытого пламени и самовоспламенения в нагретых реакторах, создают электрические разряды, нагретые твердые тела, ударные волны, различные самовозгорающиеся пирофорные материалы.

В тех случаях, когда невозможно исключить образование взрывчатой системы и появление достаточного для ее поджигания импульса, регламент обеспечения взрывобезопасности предусматривает такое выполнение технологического процесса, при котором возможный очаг горения был бы локализован в пределах аппарата или газопровода, способных безопасно выдержать последствия горения. Этот третий принцип относится в первую очередь, к использованию огнепреградителей, через каналы которых пламя не может распространиться из опасной зоны в защищаемое от взрыва пространство.

### **1.3. Содержание понятия взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла**

Понятие взрывобезопасности ОЯТЦ неразрывно связано со спецификой понятия безопасности ОЯТЦ, которая заключается в следующем.

Безопасность ОЯТЦ включает две составляющие:

- безопасную эксплуатацию ОЯТЦ и (или) безопасный вывод из эксплуатации ОЯТЦ;
- безопасные последствия проектных аварий на ОЯТЦ, которые не должны нарушать установленные нормативными документами дозовые

пределы облучения персонала и населения и пределы выбросов (в атмосферу) и сбросов (на территорию) РВ и, следовательно, не должны нарушать безопасность ОЯТЦ.

Для обеспечения безопасной эксплуатации проектом ОЯТЦ устанавливаются ПБЭ по контролируемым параметрам технологического процесса и предусматривают:

- систему контроля за достижением ПБЭ в случае нарушения нормальной эксплуатации;
- систему оповещения о достижении ПБЭ;
- системы безопасности для исключения нарушения ПБЭ в случае соблюдения их работоспособности для учтенных в проекте ОЯТЦ исходных событий, способных привести к нарушению ПБЭ;
- уставки систем безопасности (значения параметров технологического процесса для начала выполнения защитных функций системами безопасности по недопущению нарушения ПБЭ).

Согласно [38]:

– **авария на ОЯТЦ** – нарушение эксплуатации ОЯТЦ, при котором произошел выход ЯМ, РВ и (или) ИИ за предусмотренные проектом ОЯТЦ для нормальной эксплуатации границы в количествах, превышающих установленные ПБЭ. Авария характеризуется исходным событием, путями протекания и последствиями;

– **авария проектная** – авария, для которой проектом определены исходные события и конечные состояния и предусмотрены системы безопасности и (или) иные технические средства и организационные мероприятия, обеспечивающие ограничение ее последствий установленными для таких аварий пределами;

– **авария запроектная** – авария, вызванная не учитываемыми для проектных аварий исходными событиями или сопровождающаяся дополнительными по сравнению с проектными авариями отказами систем безопасности сверх единичного отказа, реализацией ошибочных решений работников (персонала);

– в проекте ОЯТЦ должны быть предусмотрены технические средства и организационные мероприятия, направленные на предотвращение проектных аварий и ограничение их последствий и обеспечивающие безопасность при любом из учитываемых в проекте исходном событии с наложением в соответствии с принципом единичного отказа, одного независимого от исходного события отказа любого из

следующих элементов систем безопасности: активного элемента или пассивного элемента, имеющего механические движущиеся части, или одной независимой от исходного события ошибки персонала.

С учетом изложенного выше рассмотрим следующие характерные особенности обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ.

1. Основной целью обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ является защита работников (персонала), населения и окружающей среды от радиационного воздействия взрыва, которое неизбежно последует в результате взрыва радиационно-химической среды и выброса РВ и радиоактивных материалов. Воздействия других опасных и вредных факторов или будут сопровождать радиационное воздействие, или проявляться самостоятельно в случае взрыва систем (элементов систем) ОЯТЦ, не содержащих РВ и ЯМ.

В таком случае основной критерий обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ можно сформулировать в следующем виде: ОЯТЦ удовлетворяет требованиям взрывобезопасности, если радиационное воздействие взрыва на работников (персонал), население и окружающую среду при взрыве в случае проектной аварии не приводит к превышению установленных пределов доз облучения работников (персонала) и населения, нормативов выбросов РВ, содержания РВ в окружающей среде, а также если ОЯТЦ ограничивает это воздействие при взрыве в случае запроектной аварии.

2. В соответствии с [38] к основным принципам обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ можно отнести следующие:

- предотвращение возникновения взрыва;
- минимизация последствий взрыва, если он произошел.

Согласно [83] к принципам обеспечения радиационной безопасности населения при ликвидации последствий взрыва на ОЯТЦ можно отнести:

- предполагаемые мероприятия по ликвидации последствий взрыва на ОЯТЦ должны приносить больше пользы, чем вреда;
- виды и масштаб деятельности по ликвидации последствий взрыва на ОЯТЦ должны быть реализованы таким образом, чтобы польза от снижения дозы ИИ, за исключением вреда, причиненного указанной деятельностью, была максимальной.

При реализации этих принципов следует учитывать, что абсолютной взрывобезопасности для ОЯТЦ не существует.



Задача обеспечения взрывобезопасности состоит в максимальном уменьшении вероятности возникновения взрыва и его последствий.

3. Меры по взрывозащите ОЯТЦ, в соответствии с п. 3.7 [38], обеспечиваются за счет последовательной реализации концепции глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения в окружающую среду ИИ, ЯМ, РВ, системы технических и организационных мер по защите физических барьеров и сохранения их эффективности, а также по защите работников (персонала), населения и окружающей среды.

Концепция глубокоэшелонированной защиты реализуется на всех этапах жизненного цикла ОЯТЦ (п. 3.10 [38]).

Согласно п. 3.9 [38] система технических и организационных мер в общем случае должна образовывать следующие основные уровни глубокоэшелонированной защиты:

- уровень 1 (условия размещения ОЯТЦ и предотвращение нарушений нормальной эксплуатации);
- уровень 2 (предотвращение проектных аварий системами нормальной эксплуатации);
- уровень 3 (предотвращение запроектных аварий системами безопасности);
- уровень 4 (управление запроектными авариями);
- уровень 5 (противоаварийное планирование).

В систему глубокоэшелонированной защиты на ОЯТЦ, являющейся одновременно и взрывозащитой, входят:

- стенки (оболочки) оборудования и установок, трубопроводов, контейнеров;
- стенки (оболочки) защитных камер и каньонов, в которых расположено оборудование;
- строительные конструкции зданий.

4. Структура предотвращения взрывопожароопасности ОЯТЦ входит составной частью в структуру обеспечения безопасности ОЯТЦ.

Согласно ст. 23 [45] государственное регулирование безопасности при использовании атомной энергии предусматривает деятельность, включающую следующие направления: нормирование, лицензирование, надзор.

С учетом этого применительно к решению задачи по предотвращению взрывопожароопасности ОЯТЦ можно заключить, что:

- на стадии нормирования устанавливают требования по предотвращению взрывопожароопасности ОЯТЦ;
- на стадии лицензирования рассматривают обоснования выполнения данных требований эксплуатирующей организацией и проводят оценку выполнения этих требований;
- на стадии надзора осуществляют контроль за выполнением этих требований.

Нормативная база по предотвращению взрывопожароопасности ОЯТЦ включает требования по:

- оценке взрывопожароопасности систем и элементов ОЯТЦ и их отнесению к классам безопасности;
- обеспечению мер по предупреждению взрывопожароопасности систем и элементов ОЯТЦ;
- обеспечению мер по взрывозащите систем и элементов ОЯТЦ.

В соответствии с изложенным подходом безопасность ОЯТЦ заключается в реализации его способности ограничивать радиационное воздействие на персонал, население, окружающую среду установленными пределами, а обеспечение безопасности ОЯТЦ – в обеспечении этой способности и ее реализации.

В таком случае взрывобезопасность ОЯТЦ, которые содержат ЯМ, РВ и РАО, заключается в реализации их способности предотвращать или исключать взрыв и ограничивать радиационное воздействие в результате взрыва на персонал, население, окружающую среду установленными пределами.

Отсюда следует, что к критериям взрывобезопасности ОЯТЦ следует отнести: предотвращение или исключение взрыва на ОЯТЦ и ограничение радиационного воздействия в результате взрыва на ОЯТЦ на персонал, население и окружающую среду установленными пределами.

Таким образом, можно заключить, что взрывобезопасность ОЯТЦ – показатель степени реализации способности глубокоэшелонированной защиты ОЯТЦ предотвращать или исключать взрыв и ограничивать радиационное воздействие в результате взрыва на персонал, население, окружающую среду, соответствующий установленным пределам безопасности ОЯТЦ.

## Глава 2.

### Нормативная база предотвращения взрывопожароопасности объектов ядерного топливного цикла

#### 2.1. Основы нормативно-правового регулирования безопасности при использовании атомной энергии

Нормативно-правовое регулирование взрывобезопасности ОЯТЦ является составной частью нормативно-правового регулирования безопасности при использовании атомной энергии, которое, в свою очередь, входит в состав общей системы нормативно-правовых актов РФ.

Нормативно-правовое регулирование ПVB при использовании атомной энергии относится к компетенции Ростехнадзора и МЧС России.

В связи с этим, для определения взаимосвязи обязательных требований по обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ, устанавливаемых различными федеральными органами исполнительной власти, необходимо знание существующей иерархии нормативно-правовых актов в РФ.

В соответствии с [84]:

– **система нормативных правовых актов** – совокупность нормативных правовых актов, принимаемых (издаваемых) и реализуемых в РФ, связанных отношениями соподчиненности и координации;

– **нормативно-правовой акт** – письменный официальный документ, принятый (изданный) в определенной форме субъектом правотворчества в пределах его компетенции и направленный на установление, изменение, разъяснение, введение в действие, прекращение или приостановление действия правовых норм, содержащих общеобязательные предписания постоянного или временного характера, распространяющиеся на неопределенный круг лиц и рассчитанные на многократное применение;

– **нормативно-правовые акты** подразделяются на законы и подзаконные нормативно-правовые акты. Законы регулируют наиболее значимые общественные отношения; подзаконные нормативно-правовые акты принимаются (издаются) на основании и во исполнение законов и не могут им противоречить.

Схема иерархии нормативно-правовых актов в РФ основана на их юридической силе и соподчиненности одних нормативно-правовых актов другим.

В соответствии с этой схемой:

- высшую юридическую силу имеет Конституция РФ;
- ФЗ РФ не могут противоречить Федеральным Конституционным законам РФ;
- нормативно-правовые акты федеральных органов исполнительной власти (включая ФНП) не могут противоречить ФЗ РФ, нормативно-правовым актам Президента РФ, Совета Федерации и Государственной Думы Федерального собрания РФ, Правительства РФ.

Согласно ст. 15 п. 4 Конституции РФ: общепризнанные принципы и нормы международного права и международные договоры РФ являются составной частью ее правовой системы. Если международным договором РФ установлены иные правила, чем предусмотренные законом, то применяются правила международного договора.

Обязательные требования, относящиеся к обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ, могут содержаться в:

- технических регламентах;
- ФЗ;
- ФНП.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ [85] ФНП утверждаются федеральными органами исполнительной власти, осуществляющими государственное регулирование безопасности при использовании атомной энергии. ФНП являются обязательными для всех лиц, осуществляющих деятельность в области использования атомной энергии.

В целях содействия соблюдению требований ФНП Ростехнадзором также разрабатываются, утверждаются и вводятся в действие РБ.

Согласно [86] РБ – это письменные официальные документы, содержащие рекомендации Ростехнадзора, в том числе:

- по применяемым методам (способам, средствам, приемам) выполнения работ;
- по используемым методикам (выполнению расчетов, оценок, оптимизации процессов);
- по проведению экспертиз и оценке безопасности;
- разъяснения и другие рекомендации по выполнению требований безопасности при использовании атомной энергии.

## **2.2. Структура нормативной базы обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла**

Нормативная база обеспечения и регулирования взрывобезопасности объектов ЯТЦ в РФ включает в себя три составляющие, каждая из которых представляет собой иерархию взаимообусловленных нормативных документов, а именно: ядерную и радиационную, промышленную, пожарную безопасность.

Такое совместное привлечение трех видов безопасности для обеспечения взрывобезопасности ОИАЭ обусловлено особенностями предотвращения взрыва и пожара. Предотвращение пожара связано с предотвращением возгорания или самовозгорания веществ и материалов (включая материалы помещений, зданий, сооружений) на воздухе. При этом режим горения веществ и материалов на воздухе может переходить в режим взрыва. В этом случае предотвращение пожара означает и предотвращение развития пожара во взрыв.

Однако пожар является лишь одной из возможных причин возникновения взрыва. К таким причинам относятся также:

- механическое воздействие на реакционно-чувствительные вещества и материалы (включая воздействие от внешнего взрыва);
- химическое воздействие реакционноспособных веществ и материалов вследствие протекания неуправляемых химических экзотермических реакций, в том числе при отсутствии их контакта с воздухом;
- тепловое воздействие при отсутствии контакта веществ и материалов с воздухом.

С этой точки зрения предотвращение взрыва означает и предотвращение пожара, который может быть инициирован продуктами взрыва при их контакте с воздухом.

Вместе с тем и взрыв, и пожар с участием ЯМ и РВ, наряду со сбросом и выбросом ЯМ и РВ, являются одними из причин возможного возникновения аварии на ОИАЭ.

Приоритетом ЯРБ является ЯРБ объекта, составной частью которой является взрывобезопасность.

Приоритетом промышленной безопасности является защита от аварий на объекте и последствий аварий, включая защиту от неуправляемых взрывов и последствий неуправляемых взрывов.

Приоритетом пожарной безопасности является предотвращение пожара на объекте и опасных факторов пожара, включая предотвращение перехода горения во взрыв.

Современная структура нормативной базы обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ включает следующие уровни:

- Технический регламент Евразийского экономического сообщества;
- ФЗ;
- ФНП;
- РБ;
- ГОСТы.

1. Технический регламент таможенного союза «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах» [87] устанавливает на единой таможенной территории Таможенного союза единые обязательные для применения и исполнения требования к оборудованию для работы во взрывоопасных средах в целях обеспечения свободного перемещения указанного оборудования, выпускаемого в обращение на единой таможенной территории Таможенного союза.

В ст. 4 Технического регламента [87] приведены требования взрывобезопасности к оборудованию для работы во взрывоопасных средах, а в статье 5 – обеспечение соответствия требованиям безопасности. В приложении 1 Технического регламента [87] приведена классификация показателей, определяющих взрывобезопасность оборудования, включая:

- классификацию взрывоопасных зон;
- классификацию оборудования по группам;
- классификацию оборудования по уровням взрывозащиты;
- виды взрывозащиты оборудования;
- классификацию оборудования по температурным классам.

2. Правовую основу обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ составляют:

- ФЗ № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» [45];
- ФЗ № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1];
- ФЗ № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [50].

ФЗ [45] определяет правовую основу обеспечения ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасности ОИАЭ (ст. 4, 20, 25, 35), включая обеспечение взрывобезопасности ОЯТЦ.

Объектами применения ФЗ [45] являются ОИАЭ, к которым относятся ОЯТЦ.

В ФЗ [45] приведены обязательные требования, относящиеся к:

- контролю за обеспечением ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасности ЯУ, радиационных источников и ПХ (ст. 4);
- разработке мер по пожарной охране и физической защите ЯУ, радиационных источников, ПХ, ЯМ и РВ (ст. 20);
- соразмерности реализуемых мер по обеспечению безопасности потенциальной опасности ОИАЭ (ст. 24);
- осуществлению надзора за ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасностью (ст. 25);
- осуществлению контроля за расходом материальных и денежных средств, предназначенных для деятельности в области регулирования ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасности (ст. 25);
- обеспечению эксплуатирующей организацией разработки и реализации мер пожарной безопасности (ст. 35).

Положения ФЗ № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [50] распространяются на все организации независимо от их организационно-правовых форм и форм собственности, осуществляющие деятельность в области промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории РФ.

В данном ФЗ [50] приведены категории опасных производственных объектов (приложение 1 к [50]) к которым, в том числе относятся объекты, на которых: получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются следующие опасные вещества: воспламеняющиеся, окисляющиеся, горючие, взрывчатые вещества; получают расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов.

В ФЗ № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1] установлено, что в отношении объектов защиты специального назначения, в том числе АС, объектов переработки, хранения радиоактивных и взрывчатых веществ и материалов, наряду с настоящим

ФЗ [1], должны соблюдаться требования пожарной безопасности, установленные нормативными правовыми актами РФ.

В данном ФЗ [1] приведены:

- основные понятия, относящиеся к тематике пожаровзрывоопасности (ст. 2);
- показатели и классификация пожаровзрывоопасности и пожарной опасности веществ и материалов (глава 3);
- классификация технологических сред по пожаровзрывоопасности и пожарной опасности (глава 4);
- классификация пожароопасных и взрывоопасных зон (глава 5);
- классификация зданий, сооружений и помещений по пожарной и взрывопожарной опасности (глава 8);
- перечень показателей, необходимых для оценки пожарной опасности веществ и материалов в зависимости от их агрегатного состояния (табл. № 9).

3. Общие нормативные требования к обеспечению взрывобезопасности объектов приведены в следующих нормативных документах:

- НП-016-05 «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла» [38];
- Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [2].

Кроме того, нормативные требования к обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ приведены в ряде ФНП, рассмотренных в главе 3.

В НП-016-05 [38] приведены:

- основные термины и определения, относящиеся к безопасности ОЯТЦ (п. 1);
- цель, критерии, принципы и общие требования обеспечения безопасности ОЯТЦ (п. 3);
- классификация систем и элементов ОЯТЦ (п. 4);
- принципы и требования по предотвращению пожаровзрывоопасности ОЯТЦ (пп. 6.7.1–6.7.13).



В «Общих правилах взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [2] приведены:

- требования к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов (пп. 3.1–3.26);
- специфические требования безопасности к отдельным типовым технологическим процессам (пп. 4.1–4.7);
- требования безопасности к аппаратурному обеспечению технологических процессов (пп. 5.1–5.6);
- анализ опасностей технологических процессов (приложение 1);
- определение категорий взрывоопасности технологических блоков (приложение 2);
- расчет участвующей во взрыве массы вещества и радиусов зон разрушений (приложение 3);
- рекомендуемые термины и определения (информационно-справочный материал).

К данной группе нормативных документов следует отнести свод правил «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» [21], в котором приведены:

- категории помещений по взрывопожарной и пожарной опасности (п. 5);
- категории зданий по взрывопожарной и пожарной опасности (п. 6);
- методы расчета избыточного давления для горючих газов, паров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (п. А 2);
- методы расчета избыточного давления взрыва для горючих пылей (п. А 3);
- методы определения категорий помещений (приложение Б);
- методика вычисления условной вероятности поражения человека (приложение Г).

4. Рекомендации по обеспечению взрывобезопасности на ОЯТЦ изложены в:

- РБ-060-10 «Положение об оценке пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств» [16];
- РБ-125-17 «Оценка пожаровзрывоопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива» [88];

– РБ-161-19 «Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов с применением пирофорных материалов на объектах ядерного топливного цикла» [89].

В РБ-060-10 приведены:

– применяемые термины и определения; перечень потенциально пожаровзрывоопасных процессов РХП предприятий ЯТЦ (раздел II, приложение 1);

– характеристики веществ и смесей, необходимые для оценки пожаровзрывоопасности технологических процессов (раздел III, приложение 2);

– условия возникновения воспламенения или взрыва при проведении технологических процессов РХП предприятий ЯТЦ (раздел IV, приложение 3);

– рекомендации по обеспечению ПВБ при проведении технологических процессов РХП предприятий ЯТЦ (раздел V);

– положения, которые рекомендуется включать в обосновывающие документы, представляемые эксплуатирующей организацией для получения лицензии на виды деятельности в области использования атомной энергии, а также в экспертное заключение о ПВБ технологических процессов (приложение 4).

В РБ-125-17 приведены:

– общие рекомендации по оценке пожаровзрывоопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива;

– рекомендации по этапам оценки пожаровзрывоопасности сорбционных систем.

В РБ-161-19 приведены рекомендации по:

– контролю за фракционным составом и удельной поверхностью пирофорных материалов;

– обеспечению безопасных условий при обращении с пирофорными материалами;

– обоснованию безопасных условий при обращении с пирофорными материалами, по установлению показателей пожаровзрывоопасности пирофорных материалов;

– установлению критериев безопасности при обращении с пирофорными материалами;

– сбору, систематизации и хранению данных по условиям самовоспламенения пирофорных материалов.

5. Перечень ГОСТов, относящихся к взрывобезопасности, включает:

- ГОСТ 12.1.044-2018 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» [32];
- ГОСТ 12.1.010-76 «Взрывобезопасность. Общие требования» [90];
- ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования» [91];

- ГОСТ Р 22.0.08.96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Взрывы. Термины и определения [4].

В ГОСТ 12.1.044-2018 приведены:

- термины и определения (п. 3);
- основные нормативные положения (п. 5);
- методы экспериментального определения основных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов (пп. 6–39).

В ГОСТ 12.1.010-76 приведены:

- требования к взрывопреупреждению (п. 2);
- требования к взрывозащите (п. 3);
- организационные и организационно-технические мероприятия по обеспечению взрывобезопасности (п. 4);
- контроль за соблюдением требований взрывобезопасности (п. 5);
- требования к содержанию стандартов по взрывобезопасности (п. 6); определение терминов, используемых в стандарте (приложение).

В ГОСТ 12.1.004-91 приведены:

- опасные факторы, воздействующие на людей и материальные ценности (п. 1.5);
- метод определения вероятности возникновения пожара (взрыва) в пожаровзрывоопасном объекте (приложение 3).

В ГОСТ Р 22.0.08.96 приведены термины и определения разновидностей взрыва.

### Глава 3.

## Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии, содержащие требования по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла

В системе обеспечения ЯРБ ОЯТЦ одной из наиболее важных составляющих является предотвращение их взрывоопасности.

В связи с этим в ФНП по обеспечению безопасности ОЯТЦ входят также обязательные требования по обеспечению ПВБ ОЯТЦ, совокупность которых представляет собой систему обязательных требований по обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ.

Данная система не является статичной, а постоянно совершенствуется в соответствии с введением новых ФНП и актуализацией обязательных требований, в том числе при их гармонизации с международным опытом по установлению норм безопасности для ОИАЭ.

Для ознакомления с современным состоянием системы требований ФНП по предотвращению возникновения аварийных взрывов на ОЯТЦ можно использовать приведенные в [92]:

- сведения о распределении ФНП, содержащих требования по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ, по типам объектов и видам их деятельности;

- подход к категорированию требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ;

- сведения о специфике взаимосвязи требований по предотвращению взрывоопасности, установленных для ОЯТЦ и отдельных типов ОЯТЦ.

### 3.1. Систематизация федеральных норм и правил в области использования ядерной энергии

Совокупность требований по обеспечению безопасности ОЯТЦ приведена в [38, 93–109]. Так как ОЯТЦ являются составной частью ОИАЭ, на них также распространяются общие требования безопасности, установленные в ФНП [110–116] для всех ОИАЭ. Приведенный перечень ФНП использовали для выявления специфики и систематизации требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ.

Согласно закону [45] ФНП устанавливают следующие виды требований:

- требования безопасности ОИАЭ;

– требования безопасности деятельности в области использования атомной энергии.

В соответствии с этим систематизацию ФНП, содержащих требования по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ, можно осуществлять по типам ОЯТЦ и видам их деятельности.

Структуру системы ФНП, в которых установлены требования обеспечения безопасности ОЯТЦ (ОИАЭ) и видов их деятельности, для наглядности удобно представить на одной диаграмме.

В обобщенном виде распределение рассматриваемой совокупности ФНП по типам ОЯТЦ и видам их деятельности представлено на рис. 37.

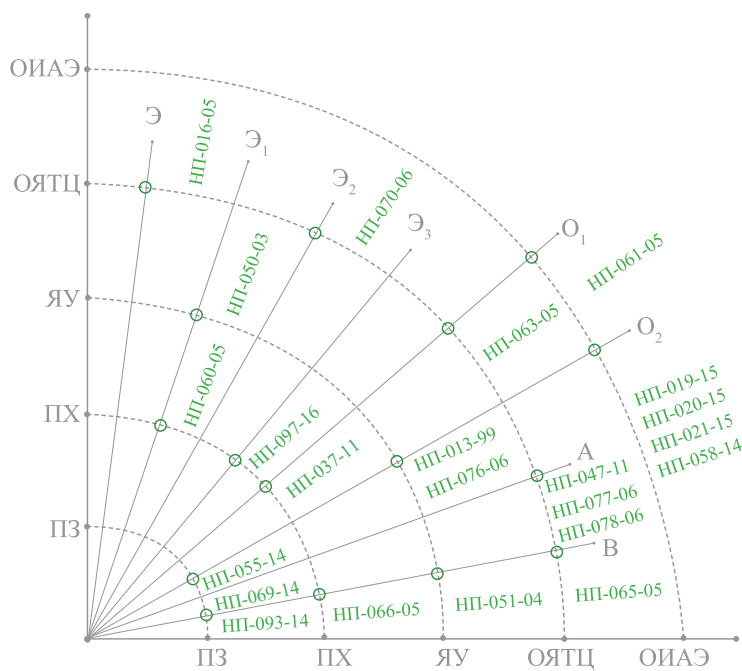


Рис. 37. Распределение федеральных норм и правил в области использования атомной энергии по типам объектов и видам деятельности объектов ядерного топливного цикла.

Э – все виды деятельности ОЯТЦ; Э<sub>1</sub> – размещение;  
Э<sub>2</sub> – эксплуатация (системы и элементы); Э<sub>3</sub> – вывод из эксплуатации;  
О<sub>1</sub> – обращение с ЯМ; О<sub>2</sub> – обращение с РАО; А – аварийная готовность;  
В – обоснование безопасности

На рис. 37 приведена структура системы ФНП для ОЯТЦ, которая включает ФНП установленные для:

- любых ОИАЭ, включая ОЯТЦ;
- совокупности ОЯТЦ;
- совокупности ЯУ;
- совокупности ПХ;
- совокупности ПЗ;
- этапов деятельности ОЯТЦ (размещение, эксплуатация, вывод из эксплуатации);
- обращения с ЯМ и РАО;
- обеспечения аварийной готовности;
- обоснования безопасности.

Представленную на рис. 37 диаграмму можно детализировать, если учитывать установленные в нормативных документах разновидности ЯУ, ПХ и ПЗ ОЯТЦ.

Как следует из рис. 37, практически все ФНП в области обеспечения безопасности ОЯТЦ (за единственным исключением [101]) содержат требования по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ.

На основании приведенного на рис. 37 распределения ФНП по типам ОЯТЦ и видам их деятельности можно сделать следующие заключения:

– структура требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ включает три уровня:

1) общие требования для всех типов ОЯТЦ и всех видов деятельности ОЯТЦ, установленные в [38];

2) общие требования для отдельных видов деятельности для всех типов ОЯТЦ, установленные для ОЯТЦ в [96, 100, 101, 104, 106, 107] и для ОИАЭ в [110–114];

3) требования для отдельных типов ОЯТЦ применительно к отдельным видам их деятельности, установленные в [93–99, 102, 105, 108, 109];

– система ФНП в области обеспечения безопасности ОЯТЦ, согласно рис. 38, допускает возможность дополнения перечня ФНП как для отдельных видов деятельности всех ОЯТЦ (размещение, вывод из эксплуатации), так и для отдельных типов ОЯТЦ и отдельных видов их деятельности (размещение ПЗ, вывод из эксплуатации ЯУ), что, в случае их

введения, может вызвать необходимость установления соответствующих требований по предотвращению взрывоопасности;

– система ФНП в области обеспечения безопасности ОЯТЦ допускает возможность дополнения перечня ФНП за счет включения ФНП для отдельных разновидностей типов и видов деятельности ОЯТЦ, что может сопровождаться установлением для них соответствующих требований по предотвращению взрывоопасности.

### **3.2. Категорирование требований**

Представленную в ФНП совокупность требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ можно разделить на следующие категории.

**1. Требования соответствия** – требования, которые устанавливают необходимость соблюдения определенных норм, правил, принципов, критериев.

К ним относятся, например, следующие требования:

– *«важные для безопасности системы (элементы) должны проектироваться в соответствии с установленными требованиями пожаровзрывобезопасности, содержащимися в нормативных правовых актах Российской Федерации»* (п. 6.7.3 [38]);

– *«проектом ПСХ ОЯТ должно быть предусмотрено обеспечение пожаро- и взрывобезопасность в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и других нормативных документов»* (п. 4.1.10 [95]).

**2. Требования приоритета** – требования, которые устанавливают приоритет в выборе вариантов, относящихся к обеспечению безопасности объекта.

К ним относятся, например, следующие требования:

– *«при выборе в проекте технологических процессов предпочтение должно отдаваться технологиям, исключающим использование взрывоопасных веществ и смесей, а в случае неизбежности использования взрывоопасных веществ и смесей – технологиям с минимальным их содержанием»* (п. 6.7.2 [38]);

– *«неблагоприятными для размещения ПХ ЯМ и РВ являются:*

*11) районы, в пределах которых расположены объекты (в том числе военного назначения), при пожаре и взрыве которых возможны*

выбросы токсичных веществ и другие воздействия, включая воздушную ударную волну и летящие предметы, а также вторичные проявления опасных факторов пожара» (п. 3.2 [99]).

**3. Требования запрещения** – требования, которые запрещают определенную деятельность или техническое решение.

К ним относятся, например, следующие требования:

– «не допускается объединение выходящих из аппаратов газовых потоков, содержащих компоненты, способные при смешивании образовывать взрывоопасные вещества и смеси» (п. 6.7.9 [38]);

– «Недопустимы для захоронения РАО: способные взрываться, в том числе при нагревании или инициировании ударом или трением» (п. 15 [108]).

**4. Требования исполнения** – требования, которые устанавливают меры, методы, средства, которые необходимо исполнить для обеспечения безопасности.

К ним относятся, например, следующие требования:

– «в проекте должны быть определены методы и средства предупреждения нарушений нормальной эксплуатации объекта ЯТЦ, в том числе методы и средства контроля содержания горючих газов и паров горючих жидкостей в местах их возможного образования и накопления» (п. 6.7.6 [38]);

– «проектом должны быть предусмотрены технические и организационные меры по предотвращению воспламенения парогазовоздушных смесей и неконтролируемого разложения смесей органических веществ с окислителями» (п. 3.21 [94]).

**5. Требования обоснования** – требования, которые необходимо выполнять при обосновании вариантов обеспечения безопасности, технических решений, применяемых мер по обеспечению безопасности.

К ним относятся, например, следующие требования:

– «обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов объекта ЯТЦ должно проводиться при наличии или образовании в технологических процессах пиррофорных материалов, смесей горючих газов и паров горючих жидкостей с воздухом или окислителем, химических веществ и смесей, способных к экзотермическому разложению или взаимодействию с выделением значительного объема газообразных продуктов» (п. 6.7.7.1 [38]);



– «представить генеральный план и его описание, включая размещение трасс водоснабжения, линий связи, подъездных путей, водозаборных узлов, наземных и подземных складов, складов пожаро- и взрывоопасных веществ» (п. 3.3.1 [98]).

На рис. 38 показана принадлежность требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ, установленных в ФНП, к приведенным категориям.

Согласно рис. 38 можно отметить следующее:

– в общих положениях обеспечения безопасности ОЯТЦ [38] используются все перечисленные категории требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ;

– требования исполнения используются в наибольшем количестве ФНП и для всех рассмотренных типов ОЯТЦ.

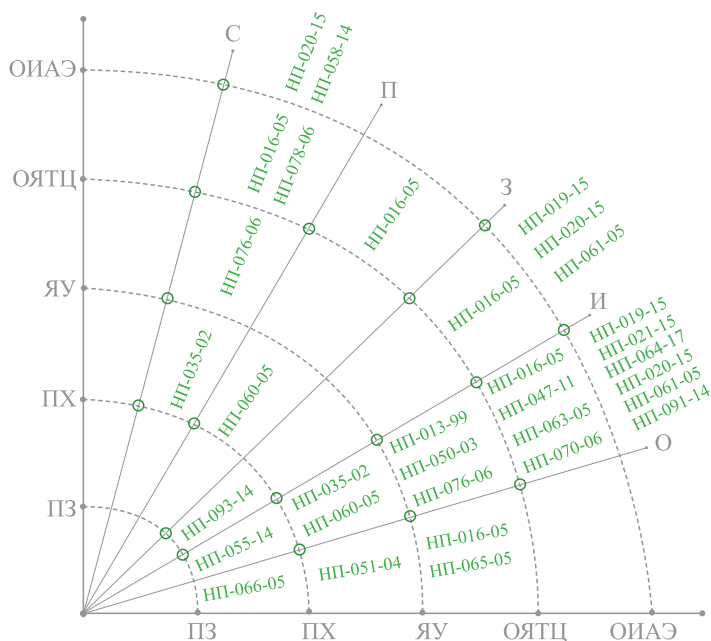


Рис. 38. Распределение федеральных норм и правил в области использования атомной энергии по категориям установленных в них требований по предотвращению взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла.

Требования: С – соответствия; П – приоритета; З – запрещения; И – исполнения; О – обоснования

### **3.3. Взаимосвязь общих и специальных требований**

Так как общие требования по обеспечению безопасности ОЯТЦ распространяются и на отдельные типы ОЯТЦ, проведен анализ общих и отличительных признаков требований по предотвращению взрывоопасности, установленных в общих положениях по обеспечению безопасности ОЯТЦ [38] и в ФНП, относящихся к отдельным типам ОЯТЦ.

Соотношение между общими и конкретными (частными, специальными) требованиями предотвращения взрывоопасности может осуществляться различными способами:

– общие требования можно трактовать как единые для данной совокупности объектов (видов деятельности) и, следовательно, относящиеся к каждому объекту данной совокупности; конкретные требования для конкретного объекта в этом случае представляют собой дополнительные требования по отношению к установленным для него единым требованиям. При этом каждое новое устанавливаемое требование может относиться или ко всем объектам, выполняя функцию общего требования, или к конкретному типу (разновидности) объектов, выполняя функцию частного требования;

– общие требования можно трактовать как интегральные для данной совокупности объектов, то есть как сумму всех требований, установленных для конкретных объектов, входящих в данную совокупность; конкретные требования представляют собой одно или несколько требований, входящих в данную совокупность требований. При этом каждое новое устанавливаемое требование автоматически включается в состав общих требований и дополнительно выполняет функции конкретного требования для соответствующих конкретных объектов.

При проведении анализа учитывали данную особенность отнесения требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ к общим требованиям.

В состав общих положений обеспечения безопасности ОЯТЦ [38] входит подраздел 6.7 «Пожаровзрывоопасность», в состав которого входят 13 пунктов, 12 из которых относятся к пожаровзрывоопасности (1 – к пожароопасности). Общие требования предотвращения взрывоопасности, установленные в [38], можно сгруппировать

в соответствии с предложенным категорированием по следующим отличительным признакам:

1. Необходимость соответствия систем (элементов) ОЯТЦ установленным требованиям и принципам по предотвращению пожаровзрывоопасности (пп. 6.7.1, 6.7.3);

2. Необходимость соблюдения приоритета при выборе технологий (п. 6.7.2);

3. Запрет на объединение газовых потоков, при смешении которых образуются взрывоопасные смеси;

4. Необходимость предусмотрения технических средств и организационных мероприятий по предотвращению пожаровзрывоопасности (пп. 6.7.4, 6.7.6, 6.7.12), в том числе:

– необходимость определения методов и средств контроля за содержанием взрывоопасных газов и паров (п. 6.7.6);

– необходимость использования мер по предотвращению образования взрывоопасных веществ и смесей (п. 6.7.8);

– необходимость использования технических средств и способов, предотвращающих развитие неуправляемых реакций (пп. 6.7.10, 6.7.11);

– необходимость обеспечения устойчивости физических барьеров к взрывам (п. 6.7.13);

5. Необходимость обоснования мер по предотвращению пожаровзрывоопасности (п. 6.7.7).

В результате проведенного анализа выявлено следующее соотношение между общими и конкретными требованиями по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ.

Согласно [38] требования по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ должны соответствовать нормативно-правовым актам РФ.

В формулировках требований для отдельных типов ОЯТЦ установлена необходимость соответствия:

– ФНП и другим нормативным документам [95];

– нормативным документам [105].

Соответственно в ФНП для ОИАЭ (применимых для ОЯТЦ) требования соответствия относятся к:

– требованиям пожарной безопасности [110];

– требованиям нормативных правовых актов [113].

Из этого следует, что общие требования соответствия, приведенные в [38], можно квалифицировать в качестве единых и унифицировать для

всех типов ОЯТЦ. Такие требования целесообразны в случае наличия потенциальной взрывоопасности и отсутствия детальной информации о необходимых конкретных способах предотвращения взрывоопасности данного ОЯТЦ.

Используемые в анализируемом перечне ФНП формулировки общего и конкретного требований приоритета приведены выше. Они в достаточной степени коррелируются друг с другом: приоритетными для принятия являются решения, не представляющие взрывоопасность. Для них также можно установить унифицированные формулировки.

Результаты проведенного анализа показали, что требования запрещения, установленные в ФНП, индивидуальны вне зависимости от принадлежности к указанным выше уровням структуры требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ.

Подтверждением этого служит следующий перечень требований, установленных в ФНП, в которых запрещается:

- захоронение взрывоопасных РАО [108];
- превышение установленного содержания взрывоопасных веществ РАО [108];
- использовать упаковки РАО, подверженные самовозгоранию [108];
- объединение газовых потоков, при смешивании которых образуются взрывоопасные смеси [38];
- полное обезвоживание высокосолевых водных сред при упаривании жидких РАО [110];
- прессование пиррофорных и взрывоопасных твердых РАО [111];
- прокладка дополнительных кабелей в хранилищах со взрывоопасными веществами [114].

Это свидетельствует в пользу интегрального принципа формирования общих требований запрещения, установленных для предотвращения взрывоопасности ОЯТЦ, и о необходимости дополнения их перечня.

Интегральный характер присущ и общим требованиям исполнения, установленным в [38], которые охватывают рассматриваемую совокупность требований не только для отдельных типов ОЯТЦ, но и для

соответствующей группы ОИАЭ. Это относится к необходимости применения:

- методов, технических средств и организационных мероприятий по предотвращению взрывоопасности [93, 94, 100, 109–112];
- мер по ограничению содержания применяемых и образуемых взрывоопасных веществ [94, 110, 111, 114];
- методов и средств контроля за содержанием взрывоопасных веществ [94, 105, 111];
- учета, оценки и анализа исходных событий, факторов воздействия взрыва [95–97, 99, 104].

При этом следует отметить, что часть общих требований исполнения, установленных в [38], характеризуют специфику предотвращения взрывоопасности ОЯТЦ и в их формулировках применены специальные термины. Это относится к необходимости предотвращения неуправляемых химических экзотермических реакций и обеспечения устойчивости физических барьеров к взрыву.

Что касается общих требований обоснования, установленных в [38] и приведенных выше, в их состав входят также следующие требования, установленные в [102] для всех ОЯТЦ, о том, что при обосновании мер по предотвращению взрывоопасности необходимо:

- привести информацию о технических средствах и организационных мероприятиях, обеспечивающих предотвращение взрывоопасности;
- провести классификацию систем (элементов) по их безопасности с учетом их взрывоопасности;
- представить информацию о соблюдении принципов обеспечения безопасности;
- представить результаты оценки взрывоопасности и анализа мер по предотвращению взрывоопасности.

Конкретные требования обоснования, установленные в [98, 102], входят в перечень общих требований обоснования, установленных в [38, 102]. Таким образом, общие требования обоснования, установленные для предотвращения взрывоопасности ОЯТЦ, можно отнести к интегральным.

Следует также отметить, что общие требования обоснования, установленные в [38], относятся к структуре оценки и анализа взрывоопасности, а установленные в [102] – к структуре мер по предотвращению взрывоопасности, то есть дополняют друг друга.

### **3.4. Комментарии к общим требованиям по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла**

Общие обязательные требования по обеспечению ПВБ ОЯТЦ изложены в [38] в разделе 6.7 «Пожаровзрывоопасность».

В соответствии с п. 6.7.1 [38] принципами предотвращения пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ являются:

- предотвращение образования взрывоопасных смесей;
- предотвращение условий, при которых возможно инициирование горения (взрыва);
- исключение источника инициирования горения (взрыва);
- минимизация последствий неуправляемых химических экзотермических реакций, сопровождающихся выделением газообразных продуктов.

Данные принципы предотвращения пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ соотносятся с приведенными в разделе 1.2 тремя принципами предотвращения взрывов газовых систем:

- 1.) исключение возможности образования горючих веществ;
- 2.) предотвращение возникновения импульсов, инициирующих горение;
- 3.) локализация очага горения в аппарате или газопроводе, способных безопасно выдержать последствия горения.

Вместе с тем здесь можно различить отдельный подход к учету внутренних (предотвращение условий, создаваемых в технологической среде) и внешних (по отношению к технологической среде) источников инициирования взрыва.

Также в п. 6.7.1 расширено понятие третьего принципа, относящегося к последствиям взрыва, в связи с приоритетом предотвращаемой опасности. Минимизация последствий взрыва в первую очередь относится к уменьшению радиационного воздействия взрыва на персонал, население и окружающую среду.

В соответствии с п. 6.7.2 [38] при выборе в проекте технологических процессов предпочтение должно отдаваться технологиям, исключающим использование взрывоопасных веществ и смесей, а в случае неизбежности использования взрывоопасных веществ и смесей – технологиям с минимальным их содержанием.

Данное требование может относиться к выбору вариантов при разработке химико-технологических процессов переработки новых типов отработавшего ядерного топлива или совершенствования традиционных способов обращения с отработавшим ядерным топливом:

- пирохимических или гидрометаллургических переделов;
- конкретных пирохимических или конкретных гидрометаллургических процессов и операций.

В соответствии с п. 6.7.3 [38] важные для безопасности системы (элементы) должны проектироваться в соответствии с установленными требованиями ПВБ, содержащимися в нормативных правовых актах РФ.

Это требование связано с существующей иерархией нормативных документов по обеспечению ПВБ промышленных объектов, в том числе ОИАЭ, к которым относятся ОЯТЦ.

Кроме того, следует учитывать [44], что при оценке безопасности предприятий ЯТЦ рассматривается предшествующий опыт эксплуатации установок в части обеспечения безопасности, включая соответствующий опыт, полученный в иных неядерных отраслях промышленности.

В соответствии с п. 6.7.4 НП-016-05 [38] в проекте должны быть предусмотрены технические средства и организационные мероприятия по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ, а также технические средства и организационные мероприятия по снижению радиационного воздействия на работников (персонал), население и окружающую среду в случае взрыва и пожара на ОЯТЦ.

Согласно данному требованию предусмотренные проектом технические средства и организационные мероприятия по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ должны:

- исключить возможность возникновения взрыва при нормальной эксплуатации ОЯТЦ;
- предотвратить возникновение взрыва при нарушениях нормальной эксплуатации ОЯТЦ;
- снизить радиационные последствия взрыва на ОЯТЦ;
- снизить вероятность возникновения взрыва на ОЯТЦ.

В соответствии с п. 6.7.5 [38] в проекте должна быть приведена оценка пожарной опасности ОЯТЦ в соответствии с требованиями

пожарной безопасности, содержащимися в нормативных правовых актах РФ.

Данное требование коррелируется с п. 6.7.3 и содержит необходимость учета специфики технологических сред ОЯТЦ, содержащих ЯМ и РВ, и особенностей химико-технологических процессов ОЯТЦ, влияющей на возникновение пожарной опасности ОЯТЦ:

- изменение значений показателей пожаровзрывоопасности под воздействием радиации;
- наличие внутреннего источника зажигания, обусловленного выделением энергии в результате радиоактивного распада и протекания ядерных реакций.

Поэтому, как это приведено в [44], для каждой отдельной установки должен быть выполнен специальный анализ пожароопасности.

В соответствии с п. 6.7.6 [38] в проекте должны быть определены методы и средства предупреждения нарушений нормальной эксплуатации ОЯТЦ, в том числе методы и средства контроля содержания горючих газов и паров горючих жидкостей в местах их возможного образования и накопления.

Требование п. 6.7.6 конкретизирует требование п. 6.7.4 в части, касающейся необходимости использования технических средств для обеспечения контроля за значениями параметров технологического процесса ОЯТЦ, влияющих на возможность возникновения взрыва. В требовании п. 6.7.6 специально выделены представляющие повышенную пожаровзрывоопасность для ОЯТЦ горючие газы (радиолитический водород) и пары горючих жидкостей (экстрагентов и разбавителей), одним из основных показателей пожаровзрывоопасности для которых являются концентрационные пределы.

Согласно [117] установка соответствующих детекторов и датчиков контроля может снизить риск взрыва огнеопасных веществ.

В соответствии с п. 6.7.7 НП-016-05 меры по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов и по организации тушения пожаров, ликвидации последствий взрывов на ОЯТЦ должны быть обоснованы в проекте ОЯТЦ и отражены в ООБ.

В соответствии с данным требованием обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических



процессов и по организации тушения пожаров, ликвидации последствий взрывов на ОЯТЦ должно быть выполнено с учетом:

- достигнутого научного уровня в области горения и взрывов;
- существующего опыта деятельности ОЯТЦ;
- соразмерности применяемых мер потенциальной опасности.

В соответствии с п. 6.7.7.1 [38] обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ должно проводиться при наличии или образовании в технологических процессах пирофорных материалов, смесей горючих газов и паров горючих жидкостей с воздухом или окислителем, химических веществ и смесей, способных к экзотермическому разложению или взаимодействию с выделением значительного объема газообразных продуктов.

В требовании приведен перечень взрывоопасных веществ и содержащих их систем с указанием их признаков, для которых обязательно должно выполняться обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ.

Некоторые из этих веществ могут входить в исходный состав технологических сред (например, экстрагенты и разбавители), а некоторые могут образовываться (например, радиолитический водород) в ходе протекания технологического процесса ОЯТЦ.

В качестве основных признаков, по которым можно оценить взрывоопасность протекающих превращений, в требовании указаны выделение тепла и увеличение объема газообразных продуктов.

В соответствии с п. 6.7.7.2 [38] в проекте ОЯТЦ должны быть представлены:

- перечень потенциально взрывоопасных веществ и смесей, горючих сред, окислителей, используемых и образующихся при проведении технологических процессов;
- обоснование исходных событий, которые могут привести к образованию взрывоопасных веществ и смесей и развитию неуправляемых химических экзотермических реакций;
- вероятностная оценка возникновения взрыва в оборудовании и (или) трубопроводах;
- оценка последствий взрыва, включая возможность возникновения самоподдерживающейся цепной ядерной реакции.

В данном требовании указана последовательность проведения обоснования мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ:

- в начале формируется перечень потенциально взрывоопасных веществ, содержащихся в технологической среде ОЯТЦ;
- затем обосновываются исходные события с участием потенциально взрывоопасных веществ, входящих в указанный перечень, которые могут при своем развитии привести к возникновению взрыва;
- после этого оценивается вероятность возникновения взрыва по выявленным траекториям аварии;
- в завершении проводится оценка последствий взрывов, для которых велика вероятность их возникновения.

В соответствии с п. 6.7.7.3 [38] обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ должно быть проведено на основе характеристик и (или) условий воспламенения или взрыва химических веществ и смесей, используемых в технологических процессах:

- для горючих газов – величины НКПВ и (или) величины минимального взрывоопасного содержания кислорода;
- для горючих жидкостей – величины температуры вспышки и (или) величины нижнего температурного предела распространения пламени;
- для конденсированных (жидких, твердых, гетерогенных) веществ и смесей – способности к экзотермическому разложению и условий возникновения химической экзотермической реакции;
- для пирофорных материалов – условий самовоспламенения.

В данном требовании указаны показатели пожаровзрывоопасности, которые должны обязательно использоваться при обосновании мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ применительно к горючим газам и горючим жидкостям.

Что касается конденсированных веществ и смесей (не относящихся к горючим жидкостям) и пирофорных материалов, то для них при обосновании мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ должны быть обязательно приведены способность к взрывчатому превращению и условия возникновения взрыва.

В [44] приведено, что:

– эксплуатация предприятия в условиях температур ниже температуры возгорания разбавителей или других критических температур – может снизить риск взрыва огнеопасных веществ;

– в ходе процесса температура экстрагента обычно поддерживается ниже температуры вспышки (70 °С); температура при нормальной эксплуатации варьируется от 30 до 60 °С;

– водород, с его высокой скоростью диффузии, низкой энергией, требуемой для воспламенения, и широким диапазоном взрывоопасных концентраций, возможно, представляет самую большую потенциальную опасность с точки зрения взрыва;

– насыщение плутонием заметно понижает температуру воспламенения смолы;

– смолы, насыщенные жидкостью, склонны к быстрому разложению;

– температура воспламенения смолы уменьшается с увеличением диаметра колонны; максимальная безопасная рабочая температура не должна превышать 80–90 °С и определена в 70 °С для таких систем, пока безопасные пределы не будут установлены более точно.

В соответствии с п. 6.7.8 НП-016-05 [38] для предотвращения пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ при пуске в работу или при остановке оборудования (аппаратов, участков трубопроводов) проектом должны быть предусмотрены меры, предотвращающие образование в нем взрывоопасных веществ и смесей.

Требование п. 6.7.8 обусловлено необходимостью учета локализации окислителя (воздуха) в застойных зонах оборудования и трубопроводов при пуске ОЯТЦ в работу и локализации взрывоопасных веществ и их смесей в застойных зонах оборудования и трубопроводов при остановке ОЯТЦ, что может привести к контакту окислителя со взрывоопасными смесями и протеканию реакций между ними в режиме взрыва.

В соответствии с международным опытом [44]:

– взрывчатые смеси могут образоваться вследствие неполного удаления воздуха из холодной печи в начале новой компании или подсоса воздуха в печь;

– в ходе процесса жидкостной экстракции органическая фаза может случайно попасть в жидкие отходы;

– хотя вероятность возникновения пожара в обеспечивающих системах относительно мала, последствия для емкости с отходами могут быть настолько серьезны, что вопросам предотвращения пожара необходимо уделить очень серьезное внимание;

– взрывы могут произойти на этапе подготовки (восстановления) порошка в конверсионной печи;

– накопление легковоспламеняющихся пыли, газа или пара может стать причиной взрыва;

– меры по предотвращению накопления огнеопасных газоздушных смесей, устранению источников воспламенения – могут снизить риск взрыва огнеопасных веществ;

– порошкообразный циркалол опасен из-за взрывоопасности его пыли.

В соответствии с п. 6.7.9 НП-016-05 [38] не допускается объединение выходящих из аппаратов газовых потоков, содержащих компоненты, способные при смешивании образовывать взрывоопасные вещества и смеси.

Требование п. 6.7.9 обусловлено необходимостью исключения достижения концентрационного предела распространения пламени при объединении выходящих из аппаратов газовых потоков, содержащих компоненты, способные при смешивании образовывать взрывоопасные вещества и смеси, в том числе с учетом реализации тепловых условий при смешивании газовых потоков.

В соответствии с п. 6.7.10 НП-016-05 [38] для непрерывных процессов смешивания веществ, взаимодействие которых может привести к развитию неуправляемых химических экзотермических реакций, должны быть установлены безопасные скорости дозирования этих веществ и способы отвода тепла, предусмотрены средства автоматического контроля и регулирования параметров процессов, ПАЗ и сигнализации.

Требование п. 6.7.10 обусловлено необходимостью исключить неуправляемое выделение тепла и газообразных продуктов при смешивании больших количеств жидких веществ, реагирующих между собой с экзотермическим эффектом (например, при смешивании концентрированных кислот с водой или растворами оснований).

В соответствии с п. 6.7.11 НП-016-05 [38] в технологических процессах, в которых возможно развитие неуправляемых химических

экзотермических реакций, должны предусматриваться технические средства и способы, предотвращающие их развитие.

Требование п. 6.7.11 обусловлено необходимостью:

- выявления потенциально возможных неуправляемых химических экзотермических реакций на основе анализа компонентов технологической среды ОЯТЦ и условий осуществления технологического процесса ОЯТЦ;
- оценки траекторий протекания выявленных неуправляемых химических экзотермических реакций;
- оценки вероятности протекания выявленных неуправляемых химических экзотермических реакций;
- оценки тяжести последствий в случае протекания выявленных неуправляемых химических экзотермических реакций;
- установления способов, предотвращения протекания выявленных неуправляемых химических экзотермических реакций, представляющих взрывоопасность;
- предусмотрение проектом ОЯТЦ технических средств, соразмерных взрывоопасности, для предотвращения протекания выявленных неуправляемых химических экзотермических реакций.

В [44] сообщается, что:

- анализ безопасности предприятия и инцидентов должен включать все возможные механизмы пожара (взрыва), чтобы минимизировать риск, связанный с этими факторами;
- экзотермические химические реакции при определенных условиях могут выйти из-под контроля в ходе технологических процессов;
- глубокое понимание механизмов и знание критических параметров является чрезвычайно важным условием для разработки и эксплуатации процесса в пределах безопасного режима.

В соответствии с п. 6.7.12 НП-016-05 [38] дозировка компонентов в технологических процессах должна быть преимущественно автоматической и осуществляться в последовательности, исключающей возможность образования внутри оборудования и трубопроводов взрывоопасных веществ и смесей или неуправляемого хода реакции.

Требование п. 6.7.12 коррелируется с требованием п. 6.7.10 и устанавливает ограничения на:

- последовательность дозировки компонентов, которая должна обеспечивать взрывобезопасность;

– использование неавтоматической дозировки компонентов в технологических процессах ОЯТЦ только в особых случаях.

В соответствии с п. 6.7.13 НП-016-05 [38] принятая в проекте ОЯТЦ система физических барьеров должна быть устойчива к возможным взрывам на ОЯТЦ, предотвращать распространение ИИ, ЯМ, РВ и (или) РАО за предусмотренные в проекте ОЯТЦ границы и обеспечивать безопасность работников (персонала), населения и окружающей среды.

Требование п. 6.7.13 относится к необходимости обеспечения локализации радиоактивных продуктов возможного взрыва внутри технологического оборудования или внутри ОЯТЦ, за счет выполнения взрывозащитных функций, физическими барьерами, которые должны выдерживать предусмотренное проектом ОЯТЦ давление в результате возможного взрыва.

### 3.5. Специфика требований к физическим барьерам объектов ядерного топливного цикла

Представление о характере установления специальных требований по обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ определенного типа можно получить при рассмотрении ФНП, разработанных для установок по производству ядерного топлива, содержащего плутоний [117].

О важности установления мер по обеспечению ПВБ данной установки говорит тот факт, что из 30 пунктов раздела «Требования к обеспечению безопасности, реализуемые при проектировании» – 12 пунктов относятся к обеспечению ПВБ.

В них установлены следующие обязательные требования.

*«Проект установки должен соответствовать основным положениям обеспечения взрыво- и пожаробезопасности, установленным федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии»* (п. 11).

Это требование повторяет общее требование обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ (п. 6.7.3 [38]) применительно к данной ЯУ.

*«Конструкция камер (боксов), в которых осуществляется обращение с ядерными материалами в виде порошков и (или) происходит образование мелкодисперсной пыли, должна предусматривать возможность использования средств пылеудаления, в том числе для*

проведения дезактивации. Такие средства должны быть определены в проекте установки» (п. 18).

Это требование направлено на исключение накопления значительных количеств мелкодисперсной пыли, способной обладать пирофорными свойствами, и обеспечение ПВБ при обращении с ней.

*«Оборудование установки, в котором производятся технологические операции с механическим воздействием на ядерные материалы и (или) в котором протекают химические реакции с использованием или образованием взрыво- и пожароопасных веществ, экзотермические реакции, должно быть размещено в герметичных камерах (боксах), спроектированных с учетом факторов опасности, связанных с этими воздействиями (реакциями)»* (п. 19).

В соответствии с этим требованием должна обеспечиваться локализация взрывопожароопасных технологических сред и потенциально возможных продуктов их взрыва в герметичных камерах (боксах), препятствующих распространению ИИ.

*«В проекте установки для всех технологических операций с порошками соединений урана и плутония, а также металлического урана должны быть предусмотрены и обоснованы меры по обеспечению взрыво- и пожаробезопасности. Должны быть определены свойства конечных и промежуточных продуктов технологического процесса производства плутонийсодержащего ЯТ, в том числе характеристики и условия воспламенения и взрыва»* (п. 20).

Это требование объединяет общие требования обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ (пп. 6.74 и 6.7.7 НП-016-05) применительно к дисперсным веществам, используемым при осуществлении технологического процесса на ЯУ.

*«В оборудовании установки, где возможно образование взрывоопасных концентраций газообразных веществ, должно быть предусмотрено их разбавление инертной атмосферой до безопасных концентраций и удаление через систему газоочистки»* (п. 21).

Данное требование направлено на исключение достижения концентрационного предела распространения пламени при контакте взрывоопасных газообразных веществ с воздухом.

*«Технологические операции производства плутонийсодержащего ЯТ, предусматривающие изготовление топливных таблеток*

*с плутонийсодержащим ЯТ, должны проводиться в герметичных камерах (боксах) с инертной атмосферой» (п. 22).*

Здесь применительно к данной установке объединены требования по локализации взрывоопасных веществ и исключению достижения концентрационного предела распространения пламени за счет создания инертной среды при обращении с потенциально возможным пиррофорным материалом.

*«В проекте установки должны быть предусмотрены меры по безопасному обращению с рециклируемыми оборотами ядерных материалов, возвращаемыми на головные стадии технологического процесса производства плутонийсодержащего ЯТ. Количество рециклируемых оборотов ядерных материалов должно быть минимизировано. В отношении нерециклируемых оборотов ядерных материалов, образующихся на установке, должны быть предусмотрены меры, исключающие их накопление на установке выше установленных и обоснованных в проекте значений» (п. 23).*

В соответствии с данным требованием должно быть исключено локальное накопление пиррофорных материалов, способных взрываться при контакте с потоком воздуха.

*«Фильтры и материалы, используемые для их изготовления, должны удовлетворять требованиям класса «трудногорючие материалы» в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84) «Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» (утверждено постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 12 декабря 1989 г. № 3683)» (п. 29).*

Согласно данному требованию материалы, используемые для изготовления фильтров, не должны реагировать с фильтруемыми взрывоопасными аэрозолями и порошками с развитием реакции в режим горения или взрыва.

*«В проекте установки должны быть предусмотрены организационные и технические меры, исключающие возможность возгорания фильтров системы газоочистки и системы вентиляции при накоплении на них взрыво- и пожароопасных веществ» (п. 30).*

*«В проекте установки должны быть определены порядок, периодичность и перечень инструментальных средств для контроля*



накопления ядерных материалов в коммуникациях и оборудовании системы газоочистки и системы вентиляции» (п. 31).

Данные требования относятся к необходимости обеспечения контроля за безопасным количеством накопленного на фильтре пирофорного материала, обеспечения отсутствия контакта пирофорного материала с воздухом при регенерации фильтра.

*«Устройства забора внешнего воздуха систем приточной вентиляции должны быть защищены от попадания в них атмосферных осадков. Не допускается попадание в воздухозаборы систем приточной вентиляции выбросов систем вытяжной вентиляции, взрыво- и пожароопасных и (или) токсичных веществ»* (п. 34).

Данное требование коррелируется с общим требованием по обеспечению взрывобезопасности, установленному применительно к объединению газовых потоков (п. 6.7.9 НП-016-05).

*«Коммуникации (воздуховоды) систем вытяжной вентиляции помещений установки, в которые возможно попадание ядерных материалов, должны быть спроектированы таким образом, чтобы при пожаре на установке с максимальными проектной пожарной нагрузкой и продолжительностью пожара были сохранены функциональные характеристики фильтров систем вентиляции и исключено их разрушение (сгорание, расплавление)»* (п. 36).

Данное требование конкретизирует общее требование по необходимости обеспечения устойчивости физических барьеров к взрывам на ОЯТЦ (п. 6.7.13 НП-016-05).

### **3.6. Основные положения по обеспечению водородной взрывобезопасности**

Поскольку одним из основных пожаровзрывоопасных веществ на ОЯТЦ является радиолитический водород, образующийся в большом количестве технологических процессов и операций, для оценки взрывобезопасности ОЯТЦ представляет значительный интерес подход, применяемый для обеспечения водородной взрывозащиты на АС, который изложен в ФНП [3].

В разделе 2 данных ФНП изложены основные принципы обеспечения водородной взрывозащиты:

*«Водородная взрывозащита на атомной станции считается обеспеченной, если:*

*а) при нормальной эксплуатации атомной станции предотвращается образование взрывоопасных водородсодержащих смесей в системах, элементах и помещениях, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением.*

*б) при проектных авариях исключается детонация и дефлаграция водородсодержащих смесей в помещениях, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением.*

*в) при запроектных авариях детонация водородсодержащих смесей исключается, а дефлаграция допускается при условии, если локализирующие системы безопасности выполняют функции, определенные проектом атомной станции» (п. 2.1).*

*«Водородная взрывозащита должна обеспечиваться путем предотвращения образования взрывоопасных водородсодержащих смесей и ослабления последствий возможных взрывов этих смесей» (п. 2.2).*

*«Предотвращение образования водородсодержащих смесей при нормальной эксплуатации атомной станции должно обеспечиваться:*

*а) ведением технологического процесса на атомной станции в соответствии с установленными в проекте эксплуатационными пределами и условиями;*

*б) герметичностью конструкции технологического оборудования, исключающей или снижающей до установленного в проекте уровня поступления водорода и других компонентов водородсодержащей смеси в помещения, расположенные в объеме, ограниченном герметичным ограждением;*

*в) работой систем (элементов), обеспечивающих водородную взрывозащиту, путем уменьшения взрывоопасных концентраций водорода и других компонентов водородсодержащих смесей в объеме, ограниченном герметичным ограждением;*

*г) контролем концентрации водородсодержащих смесей» (п. 2.3).*

*«Предотвращение дефлакации и детонации водородсодержащих смесей должно достигаться применением активных и пассивных систем (элементов), регулирующих параметры и состав водородсодержащей смеси» (п. 2.4).*

*«Ослаблением тепловых и механических воздействий, возникающих при дефлаграции и детонации должно достигаться путем использования технических средств» (п. 2.5).*

В разделе 3 данных ФНП приведены основные требования к обеспечению водородной взрывозащиты на атомной станции, реализуемые при проектировании:

*«В проекте атомной станции должны быть определены:*

*а) возможные процессы и источники, приводящие к образованию водорода в системах, элементах и помещениях, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением, с учетом особенностей технологических процессов на атомной станции при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии;*

*б) состав взрывоопасных водородсодержащих смесей в помещениях, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением, при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии;*

*в) значения и распределение в помещениях в объеме, ограниченном герметичным ограждением, концентрации водорода при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии;*

*г) места и средства контроля концентрации водорода и других компонентов, а также параметров водородсодержащей смеси в помещениях, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением;*

*д) механические и тепловые нагрузки на элементы локализующих систем (элементов) безопасности в результате возможного взрыва водородсодержащих смесей при запроектных авариях, а также возможные последствия механического и теплового воздействия на системы, элементы и помещения;*

*е) специальные конструкции для защиты от взрыва водородсодержащих смесей систем, элементов и помещений, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением;*

*ж) системы и элементы, рассчитанные на выполнение своих функций, при взрыве водородсодержащих смесей» (п. 3.1).*

*«В проекте атомной станции должны быть предусмотрены системы, обеспечивающие водородную взрывозащиту, а также меры, принятые для предотвращения скопления взрывоопасных водородсодержащих смесей в одном из сообщающихся объемов помещений*

или формирование локальных образований (застойных зон) в изолированных объемах помещений, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением» (п. 3.2).

«Обоснование водородной взрывозащиты должно быть выполнено в проекте и представлено в отчете по обоснованию безопасности атомной станции. При применении расчетных методов обоснование водородной взрывозащиты должно быть выполнено с использованием аттестованных программных средств» (п. 3.3).

«В проекте атомной станции должны быть приняты технические меры по исключению источников инициирования взрыва водородсодержащих смесей, в том числе в результате эксплуатации электротехнического оборудования» (п. 3.4).

«Оборудование и строительные конструкции, находящиеся в помещениях, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением, должны быть изготовлены из конструкционных материалов или защищены специальными покрытиями, исключающими образование водорода при нормальной эксплуатации, нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии» (п. 3.5).

«В проекте атомной станции должны быть определены и обоснованы пределы и условия безопасной эксплуатации атомной станции по параметрам водородсодержащей смеси» (п. 3.6).

«Проектом атомной станции должны быть предусмотрены средства измерения термодинамических параметров водородсодержащей смеси с представлением необходимой информации на блочный и резервный пункты управления» (п. 3.7).

«Количество точек контроля параметров водородсодержащих смесей в помещениях, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением, должно быть выбрано и обосновано в проекте атомной станции с учетом возможных мест их скопления» (п. 3.8).

«Проектом атомной станции должны быть определены и обоснованы условия срабатывания технологических блокировок по значениям параметров водородсодержащей смеси» (п. 3.9).

«Измерительные каналы системы контроля параметров должны метрологически поверяться во всем диапазоне измерения параметров водородсодержащей смеси. Диапазон контроля этих параметров должен быть определен и обоснован в проекте» (п. 3.10).

В разделе 4 данного ФНП приведены основные требования к обеспечению водородной взрывозащиты на АС, реализуемые при эксплуатации.

*«Должны быть разработаны инструкции по эксплуатации систем и элементов, обеспечивающих водородную взрывозащиту» (п. 4.1).*

*«В инструкциях по эксплуатации систем и элементов, обеспечивающих водородную взрывозащиту, должны быть приведены объем и периодичность технического обслуживания, проверок работоспособности и планового ремонта этих систем и элементов. Результаты проверок следует оформлять актом» (п. 4.2).*

*«Контроль технического состояния систем и элементов, обеспечивающих водородную взрывозащиту, должен приводиться в соответствии с требованиями инструкций по эксплуатации систем и элементов, обеспечивающих водородную взрывозащиту» (п. 4.3).*

*«Для систем и элементов, обеспечивающих водородную взрывозащиту, должны быть определены условия их вывода для технического обслуживания, проверок работоспособности и ремонта, включая минимально необходимый состав оборудования, при котором обеспечивается безопасность атомной станции» (п. 4.4).*

*«После проведения ремонта систем и элементов, обеспечивающих водородную взрывозащиту, должна быть выполнена проверка их на соответствие проектным характеристикам» (п. 4.5).*

*«Системы и элементы, обеспечивающие водородную взрывозащиту, должны быть готовы к работе с начала загрузки ядерным топливом реактора на всех уровнях мощности, включая минимальный контролируемый уровень мощности, а также в период планового предупредительного ремонта» (п. 4.6).*

*«Эксплуатирующая организация должна осуществлять контроль за ресурсом (сроком службы) систем и элементов, обеспечивающих водородную взрывозащиту» (п. 4.7).*

*«При эксплуатации атомной станции должны осуществляться подготовка работников (персонала) к эксплуатации систем и элементов водородной взрывозащиты и периодический контроль за готовностью к работе персонала, ответственного за эксплуатацию систем и элементов водородной взрывозащиты» (п. 4.8).*

В правилах пожарной безопасности при эксплуатации АС [118] приведены следующие требования по безопасному обращению с водородом при работе электролизной установки по его получению:

«– в помещениях с установками по производству водорода должны проводиться мероприятия, исключая образование застойных зон водорода;

– при содержании водорода в воздухе производственного помещения выше 20 % от нижнего предела воспламенения технологическое оборудование должно быть отключено защитой или персоналом;

– в помещении электролизной запрещается:

– пользоваться открытым огнем;

– пользоваться электронагревательными приборами и переносными лампами;

– пользоваться инструментом, способным вызвать искрообразование;

– хранить горючие и взрывчатые вещества;

– в случае утечки газа через образовавшиеся неплотности (трещины) на оборудовании необходимо немедленно отключить установку, подать азот в установку и принять меры по предотвращению образования взрывоопасной смеси, воспламенению».

В [119] приведено следующее определение:

**«Водородная взрывозащита** – технические и организационные меры, обеспечивающие при нормальной эксплуатации АС, а также при нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии, предотвращение детонации водородсодержащих смесей в оборудовании РУ и в пространстве, ограниченном герметичным ограждением РУ, а также ослабление воздействия горения водородсодержащих смесей на герметичное ограждение РУ и другие системы и элементы АС, важные для безопасности».

В Комментариях к общим положениям обеспечения безопасности АС [120] даны следующие разъяснения:

«– цель водородной взрывозащиты – предотвратить либо ограничить вредное воздействие взрывов (детонации) и горения водородсодержащих смесей на оборудование РУ, а также на последний физический барьер на пути распространения РВ в окружающую среду ГО РУ;

*– в отличие от ранее действующих ФНП, в которых требование обеспечения водородной взрывозащиты распространялось только на пространство, ограниченное ГО РУ, в действующих ФНП по локализирующим системам безопасности установлено, что требование обеспечения водородной взрывозащиты распространяется также на оборудование РУ (это явилось следствием учета уроков, имевших место нарушений в работе АС);*

*– для обеспечения водородной взрывозащиты могут использоваться различные технические и организационные решения, направленные как на исключение (снижение вероятности) образования водородсодержащих смесей, подверженных горению, в том числе детонационному (например, за счет выбора соответствующих материалов, инертизации атмосферы внутри ГО, подбора соответствующего химического режима теплоносителя первого контура), так и на контроль концентрации газов, составляющих водородсодержащие смеси, и их термодинамических параметров и удержания их в безопасных границах (каталитические рекомбинаторы, системы дожигания водорода и др.)».*

## Глава 4.

### Общие требования пожарной безопасности по предотвращению пожаров и взрывов

Согласно п. 6.7.3 ФНП [38] важные для безопасности системы (элементы) ОЯТЦ должны проектироваться в соответствии с установленными требованиями ПVB, содержащимися в нормативных правовых актах РФ.

Основным нормативным правовым актом РФ, в котором установлены общие требования обеспечения ПVB объектов защиты, обязательные для исполнения, в том числе в отношении объектов переработки, хранения радиоактивных и взрывчатых веществ и материалов, является ФЗ [1]. Вместе с тем в п. 3 ст. 1 данного ФЗ [1] приведено, что в отношении, в том числе объектов переработки, хранения радиоактивных и взрывчатых веществ, наряду с настоящим ФЗ [1], должны соблюдаться требования пожарной безопасности, установленные нормативными правовыми актами РФ.

В п. 2 статьи 48 [1] приведено, что *«исключение условий возникновения пожаров достигается исключением образования горючей среды и (или) исключением условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания»*.

Поскольку горение в случае интенсификации может переходить в режим взрыва (или инициировать взрыв взрывоопасных сред), исключение условий возникновения пожаров вместе с тем обеспечивает исключение условий возникновения взрывов горючих сред.

Особую опасность для ОЯТЦ как раз представляют химические взрывы, начинающиеся с воспламенения технологической среды. Поэтому для технологических сред ОЯТЦ выполнение установленных требований по исключению условий образования горючей среды и исключению образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания имеет первостепенное значение.

#### 4.1. Понятие горючей среды

Горючая среда определена в [1] как *«среда, способная воспламеняться при воздействии источника зажигания»*, а источник зажигания как *«средство энергетического воздействия, инициирующее возникновение горения»*.



Поскольку приведенное определение горючей среды дано в предельно обобщенном виде, могут возникать затруднения с его трактовкой и применением требований, в которых используется этот термин.

Требование исключения условий образования горючей среды позволяет предположить, что горючая среда образуется из негорючей среды и, становясь горючей, способна воспламениться при воздействии источника зажигания.

В этом случае негорючая среда не должна обладать способностью воспламениться при воздействии источника зажигания.

В [1] отсутствует определение негорючей среды, но в ст. 12 приведены следующие группы подразделяющихся по горючести веществ и материалов:

– *«негорючие – вещества и материалы, не способные гореть в воздухе. Негорючие вещества могут быть пожаровзрывоопасными (например, окислители или вещества, выделяющие горючие продукты при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом)»;*

– *«трудногорючие – вещества и материалы, способные гореть в воздухе при воздействии источника зажигания, но неспособные самостоятельно гореть после его удаления»;*

– *«горючие – вещества и материалы, способные самовозгораться, а также возгораться под действием источника зажигания и самостоятельно гореть после его удаления».*

Однако непосредственное использование приведенных определений не позволяет оценить критерий, отделяющий горючую среду от негорючей.

Действительно, при формальном подходе к анализу этого определения можно обнаружить, например, следующие противоречия:

– если негорючая среда состоит из негорючих веществ и материалов, то она не способна превратиться в горючую среду;

– если негорючая среда состоит из горючих или трудногорючих веществ и материалов, которые (по определениям) способны гореть при воздействии источника зажигания, то возникает вопрос по поводу ее отличия от горючей среды (в этом случае получается, что горючая среда не образуется, а существует заранее);

– если негорючая среда состоит из горючих или трудногорючих веществ и материалов и становится горючей средой только при воздействии

источника зажигания, то это не соотносится с требованием исключения условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания (так как утверждается, что горючая среда образуется до воздействия источника зажигания).

Таким образом, можно заключить, что в определении горючей среды приведены необходимые, но не достаточные ее признаки.

Чтобы учесть эти дополнительные признаки следует обратить внимание на сущность возникновения процесса горения.

В соответствии с принципом Н. Н. Семёнова (диаграммой Семёнова) горючие вещества и материалы начинают самостоятельно гореть, когда скорость тепловыделения при протекании реакции превысит скорость теплоотвода из зоны реакции. В этом случае теплового эффекта реакции достаточно для самостоятельного поддержания процесса горения. Совокупность значений параметров реакционной системы и окружающей среды, при достижении которых становится возможным самостоятельное протекание горения, образует границы области самовоспламенения.

Если скорость тепловыделения по реакции недостаточна, по сравнению с теплоотводом из зоны реакции, то, используя энергетическое воздействие источника зажигания, можно повысить скорость тепловыделения и снизить скорость теплоотвода, тем самым поддерживая протекание реакции в режиме горения. После удаления источника зажигания скорость тепловыделения понизится, а скорость теплоотвода увеличится до исходных уровней, что приведет к прекращению горения.

Таким образом, конкретный источник зажигания, в соответствии со своими энергетическими характеристиками, формирует для данной реакционной системы границы области воспламенения. При этом для горючих веществ область воспламенения включает в себя область самовоспламенения.

До достижения границ области воспламенения среда, состоящая из горючих и трудногорючих веществ и материалов, является негорючей, то есть не способной воспламениться от конкретного источника зажигания. По достижении границ области самовоспламенения, соответственно, из негорючей среды образуется горючая среда.

На основании изложенного горючую среду правомерно понимать, как среду, содержащую горючие и трудногорючие вещества и материалы, значения параметров которой входят в область воспламенения от

потенциально возможного источника зажигания, и которая способна воспламеняться при воздействии этого источника зажигания.

Тогда, соответственно, негорючая среда – среда, содержащая горючие и трудногорючие вещества и материалы, значения параметров которой не достигают границ области воспламенения от потенциально возможного источника зажигания, и которая не способна воспламеняться от этого источника зажигания.

Исходя из этого, горючая среда образуется из негорючей среды при достижении границ области воспламеняемости для потенциально возможного источника зажигания.

Для горючих веществ и материалов, в зависимости от энергетических характеристик источника зажигания, границы области воспламенения могут приближаться к границам области самовоспламенения или значительно удаляться от них.

#### 4.2. Способы исключения условий образования горючей среды

В статье 49 [1] приведено, что «исключение условий образования горючей среды должно обеспечиваться одним или несколькими из следующих способов», которые, с учетом их нумерации в [1], приведены в табл. № 9.

Таблица № 9

#### Перечень способов исключения образования горючей среды

№ п/п	Способ
1	Применение негорючих веществ и материалов
2	Ограничение массы и (или) объема горючих веществ и материалов
3	Использование наиболее безопасных способов размещения горючих веществ и материалов, а также материалов, взаимодействие которых друг с другом приводит к образованию горючей среды
4	Изоляция горючей среды от источников зажигания (применение изолированных отсеков, камер, кабин)

*Часть 2. Система нормативного обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла*

*Глава 4. Общие требования пожарной безопасности по предотвращению пожаров и взрывов*

<b>№ п/п</b>	<b>Способ</b>
5	Поддержание безопасной концентрации в среде окислителя и (или) горючих веществ
6	Понижение концентрации окислителя в горючей среде в защищаемом объеме
7	Поддержание температуры и давления среды, при которых распространение пламени исключается
8	Механизация и автоматизация технологических процессов, связанных с обращением горючих веществ
9	Установка пожароопасного оборудования в отдельных помещениях или на открытых площадках
10	Применение устройств защиты производственного оборудования, исключающих выход горючих веществ в объем помещения, или устройств, исключающих образование в помещении горючей среды
11	Удаление из помещений, технологического оборудования и коммуникаций пожароопасных отходов производства, отложений пыли, пуха

Условно все приведенные в табл. № 9 обязательные для исполнения требования можно разделить на две группы (рис. 39):

- 1) по исключению условий образования горючей среды в технологическом оборудовании;
- 2) по исключению условий образования горючей среды в производственном помещении.

К первой из выделенных групп можно отнести требования, относящиеся к установлению безопасных значений параметров при осуществлении технологического процесса.

Применение негорючих веществ и материалов исключает возможность горения в атмосфере воздуха. Однако следует учитывать, что на ОЯТЦ используют высокоактивные окислители (фтор, гексафторид урана), в которых могут гореть некоторые из веществ, отнесенных к категории негорючих. В связи с этим, в общем случае применение этого

к категории негорючих. В связи с этим, в общем случае применение этого способа исключения образования горючей среды целесообразно осуществлять в совокупности с другими из приведенных в табл. № 9 способами.

При выполнении требований по установлению безопасных значений массы, объема, концентраций, температуры, давления (в том числе по снижению концентраций окислителя в горючей среде в защищаемом объеме) необходимо учитывать, что они представляют собой основные, но не единственные технологические параметры, которые определяют области воспламенения, самовоспламенения и взрываемости технологических сред ОЯТЦ.

К ним также относятся: соотношения геометрических размеров технологического оборудования и конструкционных материалов, из которого оно выполнено, удельная поверхность дисперсных материалов, доза облучения технологической среды.

Кроме того, следует учитывать, что границы областей воспламенения, самовоспламенения и взрываемости являются функциями всех указанных параметров, то есть для определения и установления безопасных значений их следует рассматривать системно как совокупность взаимосвязанных параметров.

Вторую группу требований можно условно рассматривать в качестве необходимых для выполнения организационных мероприятий по исключению образования горючей среды в помещении при хранении горючих веществ и материалов на ее территории и при возможном выходе горючей среды из технологического оборудования.

Безопасное размещение в помещении веществ и материалов, взаимодействия которых друг с другом могут привести к образованию горючей среды, взаимосвязано с необходимостью их изоляции от потенциальных источников зажигания, расположенных в данном помещении.

Механизация и автоматизация технологических процессов, в которых обращаются горючие вещества и материалы, должна обеспечить не превышение безопасных значений технологических параметров, а применение устройств защиты производственного оборудования исключить выход горючих веществ и материалов в объем помещения, где они могут образовать горючую среду.

Исключить возможность образования в объеме помещения горючей среды, и, следовательно, возможность горения и взрывов в объеме помещения, технологическом оборудовании и коммуникациях должно также безопасное удаление из них пожароопасных отходов производства.

Этому способствует также установление пожароопасного оборудования в отдельных помещениях или на открытых площадках.

Таким образом, выполнение приведенной совокупности требований должно обеспечить исключение условий образования горючей среды в технологическом оборудовании и производственном объеме ОЯТЦ.

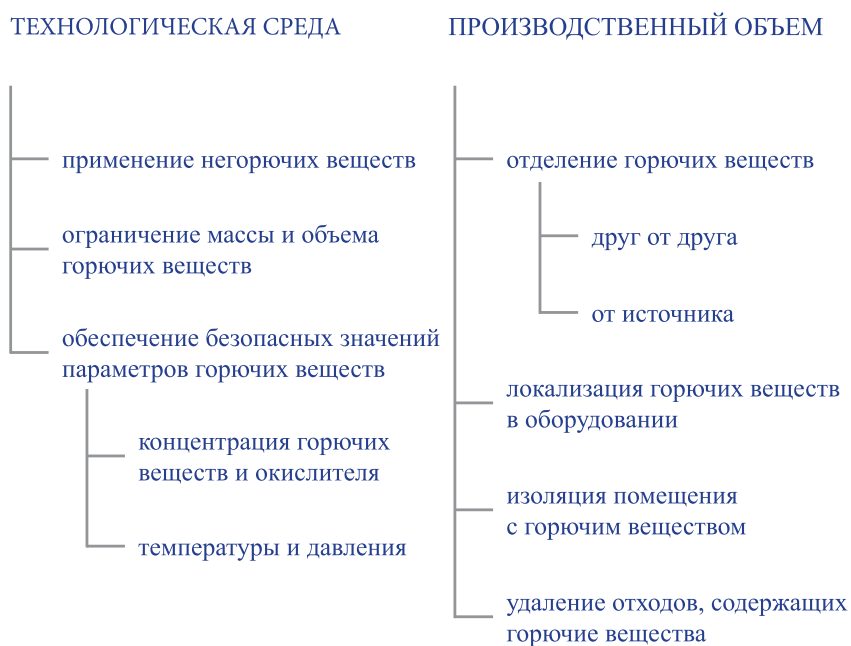


Рис. 39. Схема взаимосвязи требований по исключению условий образования горючей среды при использовании горючих веществ и материалов

достигаться одним или несколькими из следующих способов», которые, с учетом их нумерации в [1], приведены в табл. № 10.

Там же приведено, что «безопасные значения параметров источников зажигания определяются условиями проведения технологического процесса на основании показателей пожарной опасности, обращающихся в нем веществ и материалов».

Таблица № 10

**Перечень способов исключения условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания**

№ п/п	Способы
1	Применение электрооборудования, соответствующего классу пожарной и (или) взрывоопасной зоны, категории и группе взрывоопасной смеси
2	Применение в конструкции быстродействующих средств защитного отключения электроустановок или других устройств, исключающих появление источников зажигания
3	Применение оборудования и режимов проведения технологического процесса, исключающих образование статического электричества
4	Устройство молниезащиты зданий, сооружений и оборудования
5	Поддержание безопасной температуры нагрева веществ, материалов и поверхностей, которые контактируют с горючей средой
6	Применение способов и устройств ограничения энергии искрового разряда в горючей среде до безопасных значений
7	Применение искробезопасного инструмента при работе с легковоспламеняющимися жидкостями и горючими газами
8	Ликвидация условий для теплового, химического и (или) микробиологического самовозгорания обращающихся веществ, материалов и изделий
9	Исключение контакта с воздухом пирофорных веществ

№ п/п	Способы
10	Применение устройств, исключающих возможность распространения пламени из одного объема в смежный

ИСКЛЮЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

- от нагретых тел
- неуправляемых экзотермических процессов
- распространяющегося пламени

ИСКЛЮЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИСКРОВОГО РАЗРЯДА ПРИМЕНЕНИЕМ

- безопасного электрооборудования
- защитного отключения
- устройств для ограничения электрооборудования
- искробезопасного инструмента
- молниезащиты
- оборудования и режимов проведения технологического процесса, исключающих образование статического электричества

Рис. 40. Схема взаимосвязи требований по исключению образования в горючей среде источников зажигания горючих веществ и материалов, пирофорных материалов

Условно приведенные в табл. № 10 способы исключения условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания можно разделить на две группы по типу энергетического воздействия на горючую среду (рис. 40).

В соответствии с таким делением к первому типу следует отнести способы, исключающие энергетическое воздействие на горючую среду тепловых потоков от внешних и внутренних источников теплоты,



можно разделить на две группы по типу энергетического воздействия на горючую среду (рис. 40).

В соответствии с таким делением к первому типу следует отнести способы, исключающие энергетическое воздействие на горючую среду тепловых потоков от внешних и внутренних источников теплоты, приводящих к повышению температуры горючей среды до температур ее воспламенения (или самовоспламенения).

Эти способы имеют следующие разновидности, представленные в требованиях по исключению условий образования в горючей среде источников зажигания (табл. № 10):

– поддержание безопасной температуры нагретых веществ, материалов и поверхностей, которые контактируют с горючей средой (требование 5 в табл. № 10), исключающей возникновение теплового потока, повышающего температуру горючей среды до температуры ее воспламенения и создающего условия для теплового самовозгорания обращающихся веществ, материалов и изделий (требование 8 в табл. № 10);

– исключение условий для протекания неуправляемых экзотермических процессов, создающих тепловые потоки, которые воздействуют на горючую среду, воспламеняя ее, включая исключение условий для химического (в результате протекания химических реакций) и микробиологического (в результате жизнедеятельности микроорганизмов) самовозгораний обращающихся веществ, материалов и изделий (требование 8 табл. № 10);

– применение устройств, исключающих воздействия на горючую среду теплового потока от пламени, распространяющегося из одного объема в следующий при возникновении пожара (требование 10 табл. № 10).

Отдельно следует рассмотреть требование по исключению контакта с воздухом пирофорных веществ. При формальном подходе здесь к источнику зажигания следует причислить воздух. Однако воздух непосредственно не оказывает энергетическое воздействие на пирофорное вещество, в том числе в виде теплового потока, так как самовозгорание пирофорного вещества происходит при контакте с воздухом при комнатной температуре.

Данное требование скорее относится к способам исключения образования горючей среды, что соответствует требованию понижения концентрации окислителя в горючей среде в защищаемом объеме

(требование 6 в табл. № 10), которое может быть выполнено, например, при разбавлении кислорода воздуха инертным газом. Вместе с тем контакт пирофорного вещества с воздухом можно представить как инициирование неуправляемой химической экзотермической реакции, в результате которого происходит самовозгорание пирофорного вещества.

В любом случае выполнение этого требования обязательно для обеспечения ПВБ при обращении с пирофорным веществом.

Соответственно, ко второму типу следует отнести способы, исключаящие энергетическое воздействие на горючую среду искровых разрядов, приводящих к повышению температуры горючей среды до температур ее воспламенения (или самовоспламенения).

Исключение образования искровых разрядов с энергией, достаточной для воспламенения горючей среды, связано с осуществлением следующих технических мер:

- применение безопасного электрооборудования, а именно электрооборудования, соответствующего по своим техническим характеристикам классу пожарной и (или) взрывоопасной зоны, категории и группе взрывоопасной смеси (требование 1 табл. № 10);

- применение защитного отключения электрооборудования за счет размещения в его конструкции быстродействующих средств защитного отключения электроустановок или других устройств, исключающих появление искровых разрядов, способных воспламенить горючую среду (требование 2 табл. № 10);

- применение устройств для ограничения энергии искрового разряда в горючей среде до безопасных значений (требование 6 табл. № 10);

- применение искробезопасного инструмента при работе с легковоспламеняющимися жидкостями и горючими газами (требование 7 табл. № 10) и добавим, что это требование актуально для пирофорных веществ;

- применение устройств молниезащиты зданий, сооружений и оборудования от воздействия мощного природного электрического разряда (требование 4 табл. № 10);

- применение оборудования и режимов проведения технологического процесса, исключающих образование искровых разрядов статического электричества, при перемещении диэлектрических жидкостей по трубам, их смешивании и разделении, механической обработке; в потоках дисперсных горючих материалов (требование 3 табл. № 10).

Выполняя перечисленные требования необходимо учитывать, что горючие вещества и материалы, обращающиеся на ОЯТЦ, всегда содержат источник зажигания в виде источников ИИ. Поэтому большое значение для ОЯТЦ приобретает оценка энергетического воздействия ИИ на горючие вещества и материалы для нахождения условий по исключению образования горючей среды.

#### 4.4. Понятие взрывоопасной и пожаровзрывоопасной сред

Выбор конкретных способов и их числа из рассмотренных выше перечней обязательных требований по исключению условий образования горючей среды и (или) исключению условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания в определенной степени зависит от типа горючих сред.

В п. 1 статьи 16 ФЗ [1] приведено, что *«технологические среды по пожаровзрывоопасности подразделяются на следующие группы:*

- 1) *пожароопасные;*
- 2) *пожаровзрывоопасные;*
- 3) *взрывоопасные;*
- 4) *пожаробезопасные».*

В статье 14 [1] сообщается, что *«классификация технологических сред по пожаровзрывоопасности и пожарной опасности используется для установления безопасных параметров ведения технологического процесса».*

Определения различных технологических сред, приведенные в [1], представлены в табл. № 11.

Анализ приведенных в табл. № 11 определений различных по пожаровзрывоопасности групп технологических сред позволяет отметить, что они сформулированы недостаточно четко. Особенно это относится к определениям пожаровзрывоопасной и пожаробезопасной сред. Кроме того, в ФЗ [1] не приведено определение термина «пожар».

Действительно, если пожаробезопасная среда относится, в соответствии с п. 1 статьи 16 [1], к технологическим средам, а технологическая среда по определению является веществом и материалом, то не понятно, как можно отождествлять вещество и пространство, в котором вещество находится.

Что касается определения пожаровзрывоопасной среды, то сделанное в нем допущение о возможности инициирования взрыва или пожара для перечисленных разновидностей горючих веществ позволяет для случая инициирования только пожара отнести данную среду к пожароопасной. Таким образом, допускается возможность включения в состав пожаровзрывоопасных сред пожароопасные среды, что противоречит принятой классификации технологических сред.

Основным критерием отнесения технологической среды к той или иной группе по данной классификации по сути является (в соответствии с их названием) предельный режим протекания процесса в технологической среде, представляющего пожаровзрывоопасность. Это только горение или невозможность горения; горение, переходящее во взрыв; только взрыв.

Таблица № 11

**Определения различных типов технологических сред**

№ п/п	Определение
1	Технологическая среда – вещества и материалы, обращающиеся в технологической аппаратуре (технологической системе)
2	Среда относится к пожароопасным, если возможно образование горючей среды, а также появление источника зажигания достаточной мощности для возникновения пожара
3	Среда относится к пожаровзрывоопасным, если возможно образование смесей окислителя с горючими газами, парами легковоспламеняющихся жидкостей, горючими аэрозолями и горючими пылями, в которых при появлении источника зажигания возможно инициирование взрыва и (или) пожара
4	Среда относится к взрывоопасным, если возможно образование смесей воздуха с горючими газами, парами легковоспламеняющихся жидкостей, горючими жидкостями, горючими аэрозолями и горючими пылями или волокнами, и если при определенной концентрации горючего и появлении источника инициирования взрыва (источника зажигания) она способна взрываться

*Часть 2. Система нормативного обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла*  
*Глава 4. Общие требования пожарной безопасности по предотвращению пожаров и взрывов*

№ п/п	Определение
5	К пожаробезопасным средам относится пространство, в котором отсутствуют горячая среда и (или) окислитель
6	Взрывоопасная смесь – смесь воздуха или окислителя с горючими газами, парами легковоспламеняющихся жидкостей, горючими пылями или волокнами, которая при определенной концентрации и возникновении источника инициирования взрыва способна взорваться

Вместе с тем отличительные признаки пожаровзрывоопасных и взрывоопасных технологических сред в рассматриваемых определениях размыты.

Так, если сравнить разновидности горючих сред, относящихся к пожаровзрывоопасным и взрывоопасным средам, и представленным в определении взрывоопасной смеси, то получается, что:

- к пожаровзрывоопасной среде, помимо взрывоопасной смеси, относятся смеси окислителя с горючими аэрозолями (хотя отсутствуют смеси окислителя с горючими волокнами);
- к взрывоопасной среде, помимо взрывоопасной смеси, относятся смеси воздуха с горючими аэрозолями, а также с горючими жидкостями;
- в определении взрывоопасной смеси не разделяют по взрывоопасности свойства воздуха и окислителя;
- взрыв может происходить во взрывоопасной смеси при определенной концентрации, что не указано в определении пожаровзрывоопасной среды, к которой относятся взрывоопасные смеси;
- и для пожаровзрывоопасной и для взрывоопасных сред взрыв инициируется источником зажигания.

Тем не менее из рассмотрения приведенных в табл. № 11 определений можно заключить, что:

- не любая горячая среда способна взрываться;
- взрыв может происходить без возникновения пожара.

Если исходить из закономерностей протекания горения и взрыва, то можно выделить следующие различия между установленными группами технологических сред:

– среда соответствует пожароопасной технологической среде, если она способна гореть без источника зажигания, в присутствии или удалении источника зажигания, но не способна взрываться (в ней недостаточно потенциальной энергии без источника зажигания или с ним, или для нее не существует области взрываемости);

– среда соответствует пожаровзрывоопасной технологической среде, если она способна гореть и горение способно при интенсификации переходить во взрыв при наличии или отсутствии источника инициирования взрыва (для нее существует область взрываемости и значения параметров среды способны из области самовоспламенения достигать область взрываемости);

– среда соответствует взрывоопасной технологической среде, если она способна взрываться, минуя проявление стадии горения (при скоротечном и неуправляемом протекании стадии горения, малом периоде индукции и в пределе – отсутствии области самовоспламенения), при наличии или отсутствии внешнего источника инициирования взрыва (для нее существуют область взрываемости и в пределе внутри ее область детонации);

– среда соответствует пожаробезопасной технологической среде, если она не способна гореть (и взрываться) при отсутствии или наличии источника зажигания.

Отсюда следует, что для установления безопасных значений параметров ведения технологического процесса необходимо:

– для пожароопасных и пожаровзрывоопасных технологических сред – установление предельных значений параметров, исключающих возможность горения технологической среды;

– для взрывоопасных сред – установление предельных значений параметров, исключающих возможность взрыва технологической среды.

## Глава 5.

### Требования промышленной безопасности к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов

Поскольку взрывобезопасность систем (элементов) ОЯТЦ непосредственно зависит от обеспечения взрывобезопасности осуществляемых в них технологических процессов, для нормативного обеспечения ОЯТЦ большое значение приобретает учет общих требований промышленной безопасности к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов.

К основному нормативному акту РФ, в котором приведены требования к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов относятся ФНП [2]. Хотя приведенные в них требования не распространяются на ОЯТЦ, ознакомление с ними представляется полезным для оценки эффективности сложившейся системы нормативных требований по обеспечению взрывобезопасности на ОЯТЦ.

Общие требования к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов приведены в разделе III ФНП [2]. Для удобства ознакомления с ними всю их совокупность целесообразно представить в виде единой системы взаимосвязанных требований, структурировать их по целевым назначениям и сгруппировать отнесенные к одному направлению требования по функциональному признаку.

#### 5.1. Целеполагающие требования к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов

Совокупность приведенных в разделе III ФНП [2] общих требований, выполнение которых необходимо для обеспечения взрывобезопасности технологических процессов, можно разделить по целевому назначению на три исходные группы в соответствии с последовательностью этапов реализации траектории аварийного взрыва (рис. 41).

Так, в определении аварии на ОЯТЦ приведено [38], что *«авария характеризуется исходным событием, путями протекания и последствиями»*.

Если принять такую классификацию за основу, то целью выполнения требований, отнесенных к первой группе, является исключение возможности возникновения исходного события для реализации взрыва.



Рис. 41. Общая структура целеполагающих требований к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов

Выполнение требований, отнесенных ко второй группе, должно быть направлено на ограничение и ликвидацию возникших путей протекания взрывчатых превращений и тем самым на предотвращение взрыва.

Третья группа требований должна обеспечить максимальное снижение негативных последствий в случае возникновения взрыва.



Дальнейшая градация совокупности общих требований, необходимых для обеспечения взрывобезопасности технологических процессов, может быть проведена по функционально-целевому признаку в соответствии с содержанием раздела III ФНП [2].

Согласно п. 3.1 [2]: *«для каждой технологической системы должны предусматриваться меры по максимальному снижению взрывоопасности технологических блоков, входящих в нее, направленных на:*

*– предотвращение взрывов и пожаров внутри технологического оборудования;*

*– защиту технологического оборудования от разрушения и максимальное ограничение выбросов из него горючих веществ в атмосферу при аварийной разгерметизации;*

*– исключение возможности взрывов и пожаров в объеме производственных зданий, сооружений и наружных установок;*

*– снижение тяжести последствий взрывов и пожаров в объеме производственных зданий, сооружений и наружных установок».*

Значения используемых в [2] терминов, обозначающих объекты (техническая система, технический блок и др.), содержащие аппараты, в которых осуществляют технологические процессы, приведены в табл. № 12 [2].

В приведенных требованиях п. 3.1 [2] прослеживается четкая взаимосвязь с последовательностью этапов развития аварийного взрыва:

*– во-первых, необходимо предотвратить взрыв внутри технологического оборудования;*

*– если взрыв в технологическом оборудовании произошел, необходимо минимизировать разрушение технологического оборудования и минимизировать выход из оборудования технологической среды или продуктов взрыва;*

*– если имеет место разгерметизация технологического оборудования в результате взрыва, то необходимо исключить новый взрыв в производственном объеме и минимизировать ущерб от продуктов взрыва.*

Таблица № 12

**Термины, относящиеся к взрывоопасному объекту**

№ п/п	Термин	Определение
1	Технологический объект	Часть технологической системы, содержащая объединенную территориально и связанную технологическими потоками группу аппаратов
2	Технологическая система	Совокупность взаимосвязанных технологическими потоками и действующих как единое целое аппаратов, в которых осуществляется определенная последовательность технологических операций (стадий)
3	Технологический блок	Аппарат или группа (с минимальным числом) аппаратов, которые в заданное время могут быть отключены (изолированы) от технологической системы (выведены из технологической схемы) без опасных изменений режима, приводящих к развитию аварии в смежной аппаратуре или системе
4	Технологическая среда	Сырьевые материалы. Реакционная масса, полупродукты, находящиеся и перемещающиеся в технологической аппаратуре (технологической системе)
5	Взрывоопасные вещества	Вещества (материалы), способные образовывать самостоятельно или в смеси с окислителем взрывоопасную среду
6	Технологический процесс	Совокупность физико-химических или физико-механических превращений веществ и изменение значений параметров материальных сред, целенаправленно проводимых в аппарате (системе взаимосвязанных аппаратов, агрегате, машине и т. д.)

№ п/п	Термин	Определение
7	Взрывоопасный технологический процесс	Технологический процесс, проводимый при наличии в технологической аппаратуре материальных сред, способных вызвать взрыв при отклонении от заданных параметров процесса или состояния оборудования

Особенно следует подчеркнуть, что для выполнения требования п. 3.1 [2] необходимо исключить возможность возникновения взрыва в производственном объеме при аварийной разгерметизации технологического оборудования.

В общих положениях обеспечения безопасности ОЯТЦ требования п. 3.1 [38] коррелируются с требованием *«последовательной реализации концепции глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении физических барьеров на пути распространения в окружающую среду ионизирующего излучения, ядерных материалов, радиоактивных веществ, системы технических и организационных мер по защите физических барьеров и сохранению их эффективности, а также по защите работников (персонала), населения и окружающей среды»*, изложенным в п. 3.7 [38].

Кроме того, в п. 3.2 [2] охарактеризованы отличительные особенности еще одной группы требований к обеспечению взрывобезопасности технологического процесса. Там приведено, что *«технологические процессы организуются так, чтобы исключить возможность взрыва в технологической системе при регламентированных значениях их параметров. Регламентированные значения параметров, определяющих взрывоопасность процесса, допустимый диапазон их изменений, организация проведения процесса (аппаратурное оформление и конструкция технологических аппаратов, фазовое состояние обращающихся веществ, гидродинамические режимы) устанавливаются в исходных данных на проектирование исходя из данных о критических значениях параметров или их совокупности для участвующих в процессе веществ»*.

*Регламентируемые значения параметров по ведению технологического процесса указываются в технологических регламентах*

*на производство продукции как оптимальные нормы ведения технологического режима ... и подлежат контролю и регулированию в заданном диапазоне».*

Из этого следует, что структуру системы общих требований к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов можно представить следующим образом:

1) исключение возможности взрыва в технологическом оборудовании при регламентируемых значениях технологических параметров;

2) предотвращение взрывов и пожаров внутри технологического оборудования системами ПАЗ при отклонениях от регламентируемых значений технологических параметров;

3) максимальное снижение негативных последствий взрыва:

– защита технологического оборудования от разрушения;

– максимальное ограничение выбросов горючих веществ в атмосферу при аварийной разгерметизации технологического оборудования;

– исключение возможности взрывов в объеме производственных зданий, сооружений и наружных установок;

– снижение тяжести последствий взрывов и пожаров в объеме производственных зданий, сооружений и наружных установок.

Приведенная структура общих требований к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов, как следует из рассмотрения п. 3.2 [2], взаимосвязана с реализацией значений технологических параметров при осуществлении технологического процесса.

Так, в п. 3.14 [2] приведено, что *«технологические процессы не должны проводиться в пределах достижения критических значений параметров, в том числе в области взрываемости».*

Кроме того, в пп. 3.10 и 3.11 [2] приведены требования о необходимости предусматривания систем ПАЗ, предупреждающих *«возникновение аварии при отклонении от предусмотренных технологическим регламентом на производство продукции допустимых значений параметров процесса во всех режимах работы»* и обеспечивающих *«безопасную остановку или перевод процесса в безопасное состояние по заданной программе»* и о том, что *«формирование сигналов для ее срабатывания должно базироваться на*

регламентируемых предельно допустимых значениях параметров, определяемых свойствами обращающихся веществ и характерными особенностями технологического процесса».

Итак, для выполнения требований раздела III [2] необходимо установление следующих значений параметров взрывоопасного технологического процесса:

- регламентируемые значения, соблюдение которых обеспечивает взрывобезопасность технологического процесса;
- регламентируемые предельно допустимые значения, превышение которых может привести к взрыву;
- критические значения (область взрываемости), определяющие границу области взрываемости, превышение которых приводит к взрыву по завершению периода индукции.

Для оповещения о приближении к регламентируемым значениям, согласно [2], должны быть установлены предупредительные значения технологических параметров, а к регламентируемым предельно допустимым значениям – опасные значения параметров.

Определения перечисленных типов значений технологических параметров, приведенных в [2], представлены в табл. № 13.

Таблица № 13

**Термины, обозначающие значения технологических параметров**

№ п/п	Термин	Определение
1	Предупредительное значение параметра	Значение параметра на границе регламентированных (допустимых) значений параметра технологического процесса
2	Регламентированные значения параметров технологической среды	Совокупность установленных значений параметров технологической среды, характеризующих ее состояние, при которых технологический процесс может безопасно протекать в заданном направлении
3	Опасное значение параметра	Значение параметра, вышедшее за пределы регламентированного

№ п/п	Термин	Определение
		и приближающееся к предельно допустимому значению
4	Предельно допустимые значения параметров	Докритические значения параметров взрывопожароопасной среды, отличающиеся от критического значения параметра на величину, равную сумме ошибки его экспериментального или расчетного определения и погрешности средств измерения, контроля, регулирования параметров в технологическом процессе и ПАЗ
5	Довзрывная концентрация	Концентрация горючего вещества (газа, пара или горючей пыли) ниже НКПВ
6	Критические значения параметров	Значения одного или нескольких взаимосвязанных параметров (по составу материальных сред, давлению, температуре, скорости движения, времени пребывания в зоне с заданным режимом, соотношению смешиваемых компонентов, разделению смеси и т. д.), при которых возможно возникновение взрыва в технологической системе или разгерметизация технологической аппаратуры и выбросы рабочих сред в атмосферу

Здесь имеет место четкая аналогия с терминами, используемыми в общих положениях обеспечения безопасности ОЯТЦ [38].

Так, в [38] регламентируемые значения параметров соответствуют эксплуатационным пределам, а регламентируемые предельно допустимые значения параметров – ПБЭ.

Соответственно, в требованиях к ООБ ЯУ ЯТЦ предупредительные и опасные значения параметров соответствуют уставкам предупредительной и аварийной сигнализации.

Что касается критических значений параметров, то их можно квалифицировать как проектные пределы для аварии, используемые в Комментариях к общим положениям обеспечения безопасности АС [120].

## **5.2. Система требований по исключению возможности взрыва**

Приоритетной задачей обеспечения взрывобезопасности является выполнение требований по исключению возможности взрыва.

В статье 3.4.1 ФНП [2] приведены условия взрывопожаробезопасного проведения отдельного технологического процесса или его стадий. Формулировки этих условий представлены в табл. № 14 [2].

Таким образом, если эти установленные условия будут обеспечены соответствующими техническими средствами и организационными мероприятиями, то возникновение взрыва при осуществлении технологического процесса должно быть исключено.

Анализ приведенной в табл. № 14 совокупности обязательных для исполнения требований по исключению возможности возникновения взрыва при осуществлении технологического процесса позволяет рассматривать ее в качестве системы, состоящей из взаимосвязанных элементов-требований.

В таком случае появляется возможность разместить отдельные установленные требования в последовательность, характеризующую очередность принятия мер по обоснованию взрывобезопасности технологического процесса, схема которой приведена на рис. 42.

Таблица № 14

**Обеспечение условий взрывопожаробезопасного проведения технологического процесса и его стадий**

№ п/п	Условия обеспечиваются
1	Рациональным подбором взаимодействующих компонентов исходя из условия максимального снижения или исключения образования взрывопожароопасных смесей или продуктов
2	Выбором рациональных режимов дозирования компонентов, предотвращением возможности отклонения их соотношений от регламентированных значений и образования взрывоопасных концентраций в системе
3	Введением в технологическую среду, исходя из физико-химических условий процесса, дополнительных веществ: инертных разбавителей-флегматизаторов, веществ, приводящих к образованию инертных разбавителей или препятствующих образованию взрывопожароопасных смесей
4	Рациональным выбором гидродинамических характеристик процесса (способов и режима перемещения среды и смешения компонентов, напора и скорости потока) и теплообменных характеристик (теплового напора, коэффициента теплопередачи, поверхности теплообмена), а также геометрических параметров аппаратов
5	Применением компонентов в фазовом состоянии, затрудняющем или исключаящем образование взрывоопасной смеси
6	Выбором значений параметров состояния технологической среды (состава, давления, температуры), снижающих ее взрывопожароопасность
7	Надежным энергообеспечением





Рис. 42. Схема направлений создания условий для исключения возникновения взрыва в технологическом процессе

Изображенная на рис. 42 схема представляет собой следующую последовательность принятия мер, направленных на достижение поставленной цели – исключения возможности возникновения взрыва при осуществлении технологического процесса.

1. Приоритет в использовании для получения целевого продукта реагентов, не образующих взрывопожароопасные смеси или образующих взрывопожароопасные смеси с минимальной взрывопожароопасностью.

Поскольку взрывоопасные свойства химической системы, участвующей в технологическом процессе, в первую очередь, зависят от состава ее компонентов, то в качестве исходного требования по взрывобезопасному осуществлению технологического процесса выступает система требований по обеспечению взрывобезопасного состава технологической среды.

Из табл. № 6 следует, что в эту систему требований входят требования:

– максимального снижения или исключения образования взрывопожароопасных смесей или продуктов при осуществлении технологического процесса или его стадий;

– рационального подбора состава реагентов для получения заданного продукта (предпочтительно не взрывоопасных или с пониженной взрывоопасностью).

Система этих требований коррелируется с требованием ФЗ [1] о применении негорючих веществ как одного из способов исключения условий образования горючей среды.

2. Приоритет в использовании реагентов в фазовом состоянии, находясь в котором они не образуют взрывопожароопасные смеси или образуют взрывопожароопасные смеси с минимальной взрывопожароопасностью.

Из табл. № 14 следует, что это относится к требованию применения компонентов в фазовом состоянии, затрудняющем или исключающем образование взрывоопасной смеси.

3. Обеспечение взрывобезопасности технологической среды за счет добавления к реагентам компонентов, исключающих возможность возникновения взрыва при получении технологической среды установленного состава.

Из табл. № 14 следует, что это относится к требованию введения в технологическую среду исходя из физико-химических условий процесса дополнительных веществ: инертных разбавителей-флегматизаторов, веществ, приводящих к образованию инертных разбавителей или препятствующих образованию взрывопожароопасных смесей.

4. Обеспечение взрывобезопасности технологической среды за счет удаления из реагентов и дополнительных компонентов взрывопожароопасных примесей.

Требование о введении в технологическую систему дополнительного процесса или стадии очистки от примесей, способных образовывать взрывопожароопасные смеси или повышать степень опасности среды на последующих стадиях, приведено в п. 3.4.2 [2].

5. Определение совокупности критических значений параметров, характеризующих взрывопожароопасность технологической среды установленного состава.

Требование о необходимости для каждого технологического процесса определять совокупность критических значений параметров приведено в п. 3.3 [2].

В п. 3.14 [2] приведено, что технологические процессы не должны проводиться в пределах достижения критических значений параметров, а при обосновании технических решений проведения технологического процесса в пределах достижения критических значений параметров (область взрываемости) должны предусматриваться методы и средства, исключающие наличие или предотвращающие возникновение источников инициирования взрыва внутри оборудования (искры механического и электрического происхождения, нагретые тела и поверхности) с энергией или температурой, превышающей минимальную энергию или температуру зажигания для обращающихся в процессе веществ.

6. Установление регламентируемых значений параметров технологической среды, определяющих диапазоны их изменения, в которых исключается возможность возникновения взрыва, и регламентируемых предельно допустимых значений технологической среды.

Требование о необходимости установления регламентируемых значений параметров технологической среды приведено в п. 3.2 [2].

Для выбранного и обоснованного состава технологической среды далее требуется выбрать и обосновать взрывобезопасные состояния технологической среды, представляющие собой совокупности значений технологических параметров и необходимые для исключения возможности возникновения взрыва при осуществлении технологического процесса.

Этому служит требование по выбору значений параметров состояния технологической среды, снижающих ее взрывопожароопасность,

добавим – для исключения возможности возникновения взрыва при установленных регламентированных значениях технологических параметров.

Аналогичные требования по обеспечению безопасных значений параметров установлены в ФЗ [1] для горючих сред.

7. Обеспечение взрывобезопасности принятого способа получения технологической среды из реагентов и дополнительных компонентов.

Это относится к выбору наиболее взрывобезопасного способа получения данной технологической среды из реагентов и дополнительных компонентов.

Требование о необходимости взрывобезопасной загрузки дисперсных веществ приведено в п. 3.19 [2]: *«твердые дисперсные горючие вещества должны загружаться в аппаратуру в виде гранул, растворов, паст или в увлажненном состоянии»*.

Здесь применимо требование, указанное в п. 14 для режима получения технологической среды.

8. Обеспечение взрывобезопасности принятого способа осуществления технологического процесса.

Это относится к выбору наиболее взрывобезопасного способа осуществления технологического процесса.

Здесь применимо требование, указанное в п. 15 для режима осуществления технологического процесса.

9. Обеспечение взрывобезопасности принятого способа выгрузки продукта технологического процесса.

Это относится к выбору наиболее взрывобезопасного способа выгрузки продукта по завершении технологического процесса.

10. Обеспечение взрывобезопасности при обращении с взрывопожароопасными отходами технологического процесса.

Это относится к выбору наиболее взрывобезопасных способов обращения с взрывопожароопасными отходами технологического процесса.

Здесь применимо требование, указанное в п. 16 для режимов обращения с взрывопожароопасными отходами технологического процесса.

11. Использование взрывобезопасного оборудования для осуществления принятого способа получения технологической среды.

Требование о необходимости рационального выбора геометрических параметров аппаратов представлено в табл. № 14.

12. Использование взрывобезопасного оборудования для осуществления технологического процесса по принятому способу.

Требование о необходимости рационального выбора геометрических параметров аппаратов представлено в табл. № 14.

Сюда также целесообразно поместить требования, приведенные в пп. 4.6.6, 5.1.5. 5.3.2 [2]:

– «при проведении реакционных процессов, в которых возможны отложения твердых продуктов на внутренних поверхностях оборудования и трубопроводов, их забивки, в том числе и устройств аварийного слива из технологических систем, предусматриваются и осуществляются контроль за наличием этих отложений и меры по их безопасному удалению, а при невозможности обеспечения безопасной эксплуатации указанными средствами предусматривается резервное оборудование»;

– «не допускается применять для изготовления оборудования и трубопроводов материалы, которые при взаимодействии с рабочей средой могут образовывать нестабильные соединения – инициаторы взрыва перерабатываемых продуктов»;

– «технологическое оборудование и трубопроводы, контактирующие с коррозионно-активными веществами, должны изготавливаться из коррозионно-стойких металлических конструкционных материалов».

13. Использование взрывобезопасного оборудования для обращения с взрывопожароопасными отходами технологического процесса.

Требование о необходимости рационального выбора геометрических параметров аппаратов представлено в табл. № 14.

14. Обеспечение взрывобезопасного режима получения технологической среды принятым способом в выбранном технологическом оборудовании.

Требование о необходимости выбора рациональных режимов дозирования компонентов, предотвращения возможности отклонения их соотношений от регламентируемых значений и образования взрывоопасных концентраций в системе представлено в табл. № 14.

В п. 3.7 [2] приведено, что для обеспечения взрывобезопасности технологической системы при пуске в работу или остановке

технологического оборудования (аппаратов, участков трубопроводов) предусматриваются специальные меры (в том числе продувка инертными газами), предотвращающие образование в системе взрывоопасных смесей. В проектной документации разрабатываются, с учетом особенностей технологического процесса, и регламентируются режимы и порядок пуска и остановки технологического оборудования, способы его продувки инертными газами, исключая образование застойных зон. Контроль за эффективностью продувки осуществляется по содержанию кислорода и (или) горючих веществ в отходящих газах, с учетом конкретных условий проведения процесса продувки, в автоматическом режиме или методом периодического отбора проб.

В п. 3.8 [2] приведено, что количество инертных газов для каждого технологического объекта, система их транспортирования и место ввода в технологическую систему выбираются с учетом особенностей работы технологической системы, одновременности загрузки и определяются проектом. Параметры инертной среды определяются исходя из условия обеспечения взрывобезопасности технологического процесса.

Сюда также целесообразно включить требования, приведенные в пп. 4.4.7 и 4.5.11.2 [2]:

*– «измельчение, смешивание измельченных твердых горючих продуктов для исключения образования в системе взрывоопасных смесей должны осуществляться в среде инертного газа»;*

*– «сушка горючих материалов, способных образовывать взрывоопасные смеси с воздухом, должна осуществляться в атмосфере инертного газа».*

15. Обеспечение взрывобезопасного режима осуществления технологического процесса по принятому способу в выбранном технологическом оборудовании.

Требования о необходимости рационального выбора гидродинамических и теплообменных характеристик технологического процесса представлены в табл. № 14.

16. Обеспечение взрывобезопасного режима выгрузки продукта технологического процесса по принятому способу.

Это относится к выбору наиболее взрывобезопасного режима выгрузки продукта технологического процесса из технологического оборудования.

17. Обеспечение взрывобезопасных режимов обращения с взрывопожароопасными отходами технологического процесса по принятым способам в выбранном технологическом оборудовании.

Это относится к выбору наиболее взрывобезопасных режимов обращения с взрывопожароопасными отходами технологического процесса.

18. Использование взрывобезопасного энергообеспечения для установленного режима получения технологической среды принятым способом в выбранном технологическом оборудовании.

Требование о необходимости надежного энергообеспечения представлено в табл. № 14.

В п. 3.13 [2] приведено, что энергетическая устойчивость технологической системы с учетом категории взрывоопасности, входящих в нее блоков, особенностей технологического процесса, обеспечивается выбором рациональной схемы энергоснабжения, количеством источников электропитания (основных и резервных), их надежностью и должна исключать возможность:

– нарушения герметичности системы (разгерметизации уплотнений подвижных соединений, разрушения оборудования от превышения давления);

– образования в системе взрывоопасной среды (за счет увеличения времени пребывания продуктов в реакционной зоне, нарушения соотношения поступающих в нее продуктов, развития неуправляемых процессов).

Параметры, характеризующие энергоустойчивость технологического процесса, средства и методы обеспечения этой устойчивости, определяются при разработке проектной документации и устанавливаются в технологическом регламенте на производство продукции.

Средства обеспечения энергоустойчивости технологической системы должны обеспечить способность функционирования средств ПАЗ в течение времени, достаточного для исключения опасной ситуации.

Это относится к требованию надежного энергообеспечения для исключения отклонений от регламентируемых значений параметров технологической среды и исключению источников иницирования взрыва.

19. Использование взрывобезопасного энергообеспечения для установленного режима осуществления технологического процесса принятым способом в выбранном технологическом оборудовании.

Требование о необходимости надежного энергообеспечения представлено в табл. № 14.

20. Использование взрывобезопасного энергообеспечения для установленного режима обращения с взрывопожароопасными отходами технологического процесса принятыми способами в выбранном технологическом оборудовании.

Требование о необходимости надежного энергообеспечения представлено в табл. № 14.

В п. 3.4 [2] приведено, что *«способы и средства, исключаяющие выход параметров за установленные пределы, приводятся в исходных данных на проектирование, а также в проектной документации и технологическом регламенте на производство продукции»*.

Схема очередности представления информации по данным способам и средствам в исходные данные на проектирование и в проектную документацию (на основании п. 3.4.1 [2]) показаны на рис. 43.



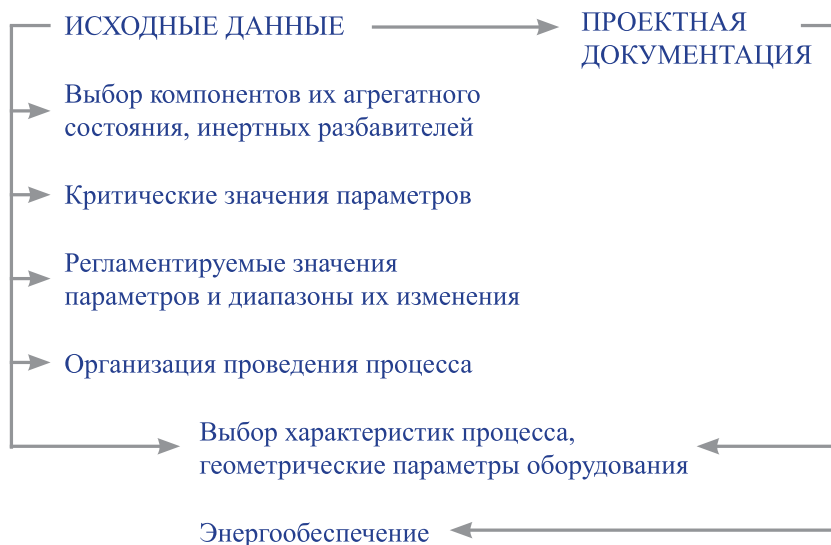


Рис. 43. Схема взаимосвязи требуемых данных, представляемых в исходных данных и проекте

Как следует из рис. 43, основной объем информации по обеспечению взрывобезопасности технологического процесса должен быть представлен на стадии выдачи исходных данных на проектирование.

Так как технологический процесс может осуществляться в совокупности аппаратов одной технологической системы, то исключение возможности возникновения взрыва в технологическом процессе может распространяться на всю технологическую систему.

В п. 3.4.2 [2] приведены требования по обеспечению оптимальных условий взрывопожаробезопасности для технологической системы, которые представлены в табл. № 15 [1].

Таблица № 15

**Обеспечение оптимальных условий  
взрывопожаробезопасности технологической системы**

№ п/п	Оптимальные условия обеспечиваются
1	Рациональным выбором технологической системы с минимально возможными относительными энергетическими потенциалами входящих в нее технологических блоков, которые определяются на стадии проектирования
2	Разделением отдельных технологических операций на ряд процессов или стадий (смещение компонентов в несколько стадий, разделение процессов на реакционные и массообменные) или совмещением нескольких процессов в одну технологическую операцию (реакционный с реакционным, реакционный с массообменным), позволяющим снизить уровень взрывоопасности
3	Введением в технологическую систему дополнительного процесса или стадии очистки от примесей, способных образовывать взрывопожароопасные смеси или повышать степень опасности среды на последующих стадиях

Приведенные требования представляют собой организационные меры по обеспечению взрывобезопасности всей технологической системы и их целесообразно рассматривать совместно с п. 3.5 [2], в котором приведены необходимые меры, направленные на обеспечение взрывобезопасности при подключении и отключении периодически действующих аппаратов для технологической системы непрерывного действия.

По сути, эти требования можно квалифицировать как принципы обеспечения оптимальных условий взрывопожаробезопасности технологической системы.

Их можно разделить и сформулировать следующим способом:

1. **Принцип минимизации взрывопожароопасности суммы элементов (технологических блоков) технологической системы**

Если использовать в качестве критерия взрывопожароопасности (как это приведено в п. 3.4.2 [2]) относительный энергетический потенциал ( $Q$ ), то этот принцип можно представить в виде:

$$\sum Qi = Q_{min}, \quad (22)$$

где  $I = 1, 2, \dots, N$  – число аппаратов (технологических блоков) в технологической системе.

Так как, согласно Приложению № 2 [2], относительный энергетический потенциал функционально связан с приведенной массой парогазовой среды ( $m$ ), то принцип минимизации можно также представить в виде:

$$\sum m_i = m_{min}. \quad (23)$$

На рис. 44 приведена зависимость относительного энергетического потенциала от приведенной массы парогазовой среды, на которой отмечены критические значения (точки 1 и 2), установленные для категорирования взрывоопасности технологических блоков. Согласно таблице, представленной в п. 2.2 [2], технологические блоки относятся к первой категории взрывоопасности, если  $Q > 37$  и  $m > 5\,000$  кг, II категории, если  $Q = 27 - 37$  и  $m = 2\,000 - 5\,000$  кг, III категории, если  $Q < 27$  и  $m < 2\,000$  кг. Кроме того, в пп. 3.20.2 и 3.20.32 отдельно выделены технологические блоки, имеющие  $Q < 10$  (согласно рис. 44,  $m < 98$  кг).

Методика расчета относительного энергетического потенциала и приведенной массы парогазовой смеси приведена в Приложении № 2 [2].

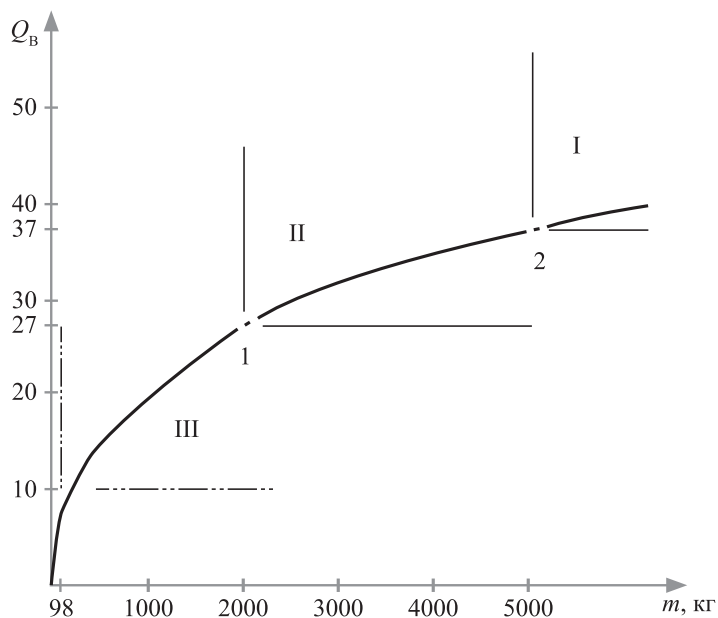


Рис. 44. Показатели категорий взрывоопасности технологических блоков

## 2. Принцип снижения категории взрывоопасности технологической системы посредством разделения технологического процесса на отдельные стадии

Этот принцип можно проиллюстрировать следующим примером.

Пусть имеется технологическая система с технологическим блоком со следующими характеристиками относительного энергетического потенциала и приведенной массы парогазовой смеси:  $Q = 39/4$ ,  $m = 6\ 000$  кг.

В соответствии с принятой классификацией этот блок относится к I категории взрывоопасности. Если данный технологический процесс можно осуществлять в двух технологических блоках с приведенной массой парогазовой смеси в каждом из них по  $m = 3\ 000$  кг, то, согласно рис. 8, относительный энергетический потенциал каждого технологического блока составит  $Q = 31,2 < 37$ , то есть каждый технологический блок будет уже соответствовать II категории взрывоопасности. Соответственно, если

исходный технологический блок можно разделить на шесть одинаковых аппаратов, то относительный энергетический потенциал и приведенная масса парогазовой смеси для каждого из них будут составлять  $Q = 21,7 < 27$  и  $m = 1\ 000\ \text{кг} < 2\ 000\ \text{кг}$  и они уже будут относиться к III категории взрывоопасности.

**3. Принцип превышения категории взрывоопасности технологического блока при совмещении в нем нескольких технологических стадий**

Этот принцип также можно проиллюстрировать примером.

Пусть в технологической системе имеется два технологических блока с  $Q = 17,2 < 27$  и  $m = 500\ \text{кг} < 2\ 000\ \text{кг}$ , относящиеся к III категории взрывоопасности.

Если проводимые в них технологические операции можно совместить в одном технологическом блоке, то, согласно рис. 8, его относительный энергетический потенциал возрастет до 21,7 ( $< 27$ ), а приведенная масса парогазовой смеси до 1 000 кг ( $< 2\ 000\ \text{кг}$ ). При этом категория взрывоопасности данной технологической системы не изменится.

**4. Принцип снижения взрывоопасности технологической системы посредством снижения содержания в технологической среде взрывоопасных примесей**

Согласно табл. № 15, это должно достигаться в результате введения в технологическую систему стадии очистки от взрывопожароопасных примесей.

**5. Принцип обеспечения взрывобезопасности при отключении (подключении) периодически действующих аппаратов от (к) непрерывной технологической линии**

Согласно табл. № 15 для этого должны быть предусмотрены соответствующие меры.

### **5.3. Система требований по предотвращению возникновения взрыва**

Требования, изложенные в [2] по предотвращению возникновения взрыва в технологическом оборудовании при отклонении значений параметров технологической среды от регламентируемых значений, можно разделить на две группы.

К первой группе следует отнести требования, направленные на предотвращение или исключение причины возникновения отклонений значений параметров технологической среды от установленных регламентируемых значений, а именно требования по предотвращению или исключению образования в технологической среде источников инициирования взрыва (источников зажигания).

Соответственно, во вторую группу входят требования, относящиеся к ликвидации возникших отклонений в значениях параметров технологической среды и возвращению их к установленным регламентируемым значениям.

Требования, относящиеся к первой из перечисленных групп, приведены в п. 3.14 [2]:

– *«технологические процессы не должны проводиться в пределах достижения критических значений параметров, в том числе области взрываемости»;*

– *«при обосновании технических решений проведения технологического процесса в пределах достижения критических значений параметров (область взрываемости) должны предусматриваться методы и средства, исключаяющие наличие или предотвращающие возникновение источников инициирования взрыва внутри оборудования (искры механического и электрического происхождения, нагретые тела и поверхности) с энергией или температурой, превышающей минимальную энергию или температуру зажигания для обращающихся в процессе веществ»;*

– *«выбор методов и средств, исключаяющих образование этих источников зажигания или обеспечивающих снижение их энергий, в каждом конкретном случае определяется с учетом категории взрывоопасности технологического блока, особенностей технологического процесса».*

Требования по предотвращению возможности взрыва в технологическом оборудовании, в свою очередь, подразделяются на требования, относящиеся к:

- необходимости использования инертных газов;
- необходимости использования надежных средств контроля за изменениями значений параметров технологической среды;
- необходимости использования средств ПАЗ.

В пп. 3.6 и 3.26 приведены следующие требования по использованию инертных газов и флегматизирующих добавок для предотвращения взрыва в технологическом оборудовании:

– «технологические системы (технологическое оборудование, трубопроводы, аппараты, технологические линии), в которых при отклонениях от регламентированного режима проведения технологического процесса возможно образование взрывопожароопасных смесей, обеспечиваются системами подачи в них инертных газов (инертных сред), флегматизирующих добавок или другими техническими средствами, предотвращающими образование взрывоопасных смесей или возможность их взрыва при наличии источника инициирования»;

– «управление системами подачи инертных газов и флегматизирующих добавок осуществляется дистанционно (вручную или автоматически) в зависимости от особенностей проведения технологического процесса. Для производств, имеющих в своем составе технологические блоки I и II категорий взрывоопасности, предусматривается автоматическое управление подачей инертных сред; для производств с технологическими блоками III категории – управление дистанционное, неавтоматическое, а при  $Q_v \leq 10$  допускается ручное управление»;

– «в процессах, в которых при отклонении от заданных технологических режимов возможно попадание взрывопожароопасных продуктов в линию подачи инертных газов (пар, азот и другие среды), на последней устанавливается обратный клапан».

Общие требования по использованию средств контроля приведены в пп. 3.9, 3.20.2 [2]:

– «технологические системы должны оснащаться средствами контроля за параметрами, определяющими взрывоопасность процесса, с регистрацией показаний и предаварийной (а при необходимости – предупредительной) сигнализацией их значений, а также средствами автоматического регулирования и противоаварийной защиты»;

– «производства, имеющие в своем составе технологические блоки III категории взрывоопасности, оснащаются системами автоматического (с применением вычислительной техники или без нее) регулирования, средствами контроля параметров, значения которых определяют взрывоопасность процесса, эффективными быстродействующими системами, обеспечивающими приведение

технологических параметров к регламентированным значениям или остановке процесса.

Для технологических блоков, имеющих  $Q_6 \leq 10$ , предусматривается применение ручного регулирования при автоматическом контроле параметров, значения которых определяют взрывоопасность процесса».

Требования по использованию ПАЗ изложены в пп. 3.10, 3.11, 3.12 [2]:

– «для взрывоопасных технологических процессов должны предусматриваться системы ПАЗ, предупреждающие возникновение аварии при отклонении от предусмотренных технологическим регламентом на производство продукции предельно допустимых значений параметров процесса во всех режимах работы и обеспечивающие безопасную остановку или перевод процесса в безопасное состояние по заданной программе»;

– «для взрывоопасных технологических процессов с блоками III категории взрывоопасности при  $Q_6 \leq 10$  при специальном обосновании в проектной документации допускается применение системы противоаварийной защиты с ограниченным применением средств автоматики»;

– «системы ПАЗ включаются в общую автоматизированную систему управления технологическим процессом (АСУТП). Формирование сигналов для ее срабатывания должно базироваться на регламентированных предельно допустимых значениях параметров, определяемых свойствами обращающихся веществ и характерными особенностями технологического процесса»;

– «технологические объекты, в том числе с периодическими процессами, имеющие в своем составе технологические блоки I и II категорий взрывоопасности, оснащаются системами контроля, управления и ПАЗ пуска и выхода на регламентируемый режим работы и остановки».



#### 5.4. Требования по ликвидации последствий взрыва

Требования, изложенные в [2], по минимизации последствий взрыва в технологическом оборудовании, можно подразделить на три группы:

1) по защите технологического оборудования от разрушений в результате взрыва;

2) по минимизации объема выбросов продуктов из технологического оборудования;

3) по исключению возможности возникновения нового взрыва в объеме производственного помещения, в том числе инициируемого продуктами произошедшего взрыва в технологическом оборудовании.

Требования по защите технологического оборудования приведены в пп. 3.15, 3.20.1, 3.20.2, 3.20.4, 3.21, 3.22 [2]:

– «технологические системы с взрывоопасной средой, в которых согласно пункту 3.14 предусмотрены меры, исключающие наличие или предотвращающие возникновение источников инициирования взрыва внутри оборудования, но в которых полностью невозможно исключение опасных источников зажигания (вероятность появления источников зажигания остается высокой), должны оснащаться средствами взрывопредупреждения и защиты оборудования и трубопроводов от разрушений (мембранными предохранительными устройствами, взрывными клапанами, системами флегматизации инертным газом, средствами локализации пламени».

– «для производств, имеющих в своем составе технологические блоки I и II категорий взрывоопасности, разрабатываются специальные меры:

размещение технологического оборудования в специальных взрывозащитных конструкциях;

оснащение производства автоматизированными системами управления и ПАЗ, обеспечивающей автоматическое регулирование процесса и безаварийную остановку производства по специальным программам, определяющим последовательность и время выполнения операций отключения при аварийных выбросах взрывопожароопасных веществ из технологического оборудования, а также снижение или исключение возможности ошибочных действий производственного персонала при ведении процесса, пуске и остановке производства и другие меры»;

– «для технологических блоков всех категорий взрывоопасности и (или) отдельных аппаратов, в которых обращаются взрывопожароопасные продукты, предусматриваются системы аварийного освобождения, которые комплектуются запорными быстросрабатывающими устройствами»;

– «системы аварийного освобождения технологических блоков I и II категорий взрывоопасности обеспечиваются запорными устройствами с автоматически управляемыми приводами, для III категории блоков разрешено применение средств с ручным приводом, размещаемым в безопасном месте, и минимальным регламентируемым временем срабатывания»;

– «для аварийного освобождения технологических блоков от обращающихся продуктов используются оборудование технологических установок или специальные системы аварийного освобождения. Специальные системы аварийного освобождения должны находиться в постоянной готовности:

исключать образование взрывоопасных смесей как в самих системах, так и в окружающей атмосфере, а также развитие аварий;

обеспечивать минимально возможное время освобождения;

оснащаться средствами контроля и управления.

Специальные системы аварийного освобождения не должны использоваться для других целей»;

– «вместимость системы аварийного освобождения (специальной, или в виде оборудования технологических установок, предназначенного для аварийного освобождения технологических блоков) рассчитывается на прием продуктов в количествах, определяемых условиям безопасной остановки технологического процесса».

Требования по минимизации объема выбросов продуктов из технологического оборудования приведены в пп. 3.20, 3.20.3, 3.23, 3.24, 3.25 [2]:

– «для каждого технологического блока с учетом его энергетического потенциала проектной организацией разрабатываются меры и предусматриваются средства, направленные на предупреждение выбросов горючих продуктов в окружающую среду или максимальное ограничение их количества, а также предупреждение взрывов и предотвращение травмирования производственного персонала.

Достаточность выбранных мер и средств в каждом конкретном случае обосновывается в проекте»;

– «для максимального снижения выбросов в окружающую среду горючих и взрывопожароопасных веществ при аварийной разгерметизации системы необходимо предусмотреть следующие меры:

для технологических блоков I категории взрывоопасности – установка автоматических быстродействующих запорных и (или) отсекающих устройств со временем срабатывания не более 12 секунд;

для технологических блоков II и III категорий взрывоопасности – установка запорных и (или) отсекающих устройств с дистанционным управлением и временем срабатывания не более 120 секунд;

для блоков с относительным значением энергетического потенциала  $Q_e \leq 10$  – установка запорных устройств с ручным приводом, при этом предусматривается минимальное время приведения их в действие за счет рационального размещения (максимально допустимого приближения к рабочему месту оператора), но не более 300 секунд.

При этом должны быть обеспечены условия безопасного отсечения потоков и исключены гидравлические удары»;

– «сбрасываемые горючие газы, пары и мелкодисперсные материалы должны направляться в закрытые системы для дальнейшей утилизации или в системы организованного сжигания. Выделяемый в технологическом процессе избыток чистого водорода подлежит сбросу в атмосферу»;

– «не допускается объединение газовых выбросов, содержащих вещества, способные при смешивании образовывать взрывоопасные смеси или нестабильные соединения.

При объединении газовых линий сбросов парогазовых сред из аппаратов с различными параметрами давлений необходимо предусматривать меры, предотвращающие переток сред из аппаратов с высоким давлением в аппараты с низким давлением»;

– «при наличии жидкой фазы в газовом потоке на линиях сброса газов должны предусматриваться устройства, исключаящие ее унос».

Требования по исключению возможности возникновения взрыва в производственном помещении приведены в пп. 3.16, 3.19 [2] (а также в разделе 5.1):

– «технологические системы, в которых обращаются горючие продукты (газообразные, жидкие, твердые), способные образовывать

*взрывоопасные смеси с воздухом, должны быть герметичными и исключать создание опасных концентраций этих веществ в окружающей среде во всех режимах работы»;*

*– «для технологических систем на стадиях, связанных с применением твердых пылящих и дисперсных веществ, предусматриваются меры и средства, максимально снижающие попадание горючей пыли в атмосферу производственного помещения (рабочей зоны), наружных установок и накопление ее на оборудовании и строительных конструкциях, а также средства пылеуборки, ее периодичность и контроль запыленности воздуха».*

Поскольку в соответствии с п. 3.18 [2] при разработке мероприятий по предотвращению взрывов и пожаров в объеме зданий и сооружений должны учитываться нормы ФЗ [1], то для исключения возможности возникновения повторного взрыва необходимо использовать способы исключения образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания, приведенные в [1].

## Глава 6.

### Критические значения параметров взрывоопасных технологических процессов

#### 6.1. Понятие критических значений параметров

Требования по обеспечению взрывобезопасности технологических процессов исходят из существования для каждой взрывоопасной технологической среды критических значений технологических параметров, характеризующих ее взрывоопасность, при нарушении которых через определенное время, обусловленное интенсивным развитием взрывчатого превращения, обязательно происходит взрыв.

Достижение критических значений параметров данной взрывоопасной технологической среды зависит от:

- режима осуществления технологического процесса и нарушений установленных значений технологических параметров;
- характеристик технологического оборудования, в котором находится среда;
- характеристик воздействия на нее дополнительных источников энергии.

По отношению к данной взрывоопасной технологической среде характеристики применяемого технологического оборудования и возможных источников энергетического воздействия также имеют критические значения параметров, нарушение которых приводит к нарушению критических значений параметров технологической среды и в итоге к взрыву.

В связи с этим требования по обеспечению взрывобезопасности применяемого технологического процесса направлены на:

- предотвращение достижения при его осуществлении установленных критических значений контролируемых технологических параметров и характеристик технологического оборудования, характеризующих взрывоопасность;
- предотвращение достижения критических значений параметров неконтролируемых при его осуществлении дополнительных источников энергии, воздействующих на технологическую среду и технологическое оборудование.

Исключительно важное значение при этом приобретает обоснование установления для данного технологического процесса

необходимой совокупности параметров, не нарушение критических значений которых обеспечивает его взрывобезопасность.

Так, согласно п. 3.2 [2]: *«регламентируемые значения параметров, определяющих взрывоопасность процесса, допустимый диапазон их изменений, организация проведения процесса устанавливаются в исходных данных на проектирование исходя из данных о критических значениях параметров или их совокупности для участвующих в процессе веществ».*

В п. 3.3 [2] приведено, что *«для каждого технологического процесса определяется совокупность критических значений параметров».*

В п. 3.17 [2] изложено требование, по которому *«мероприятия по предотвращению взрывов и пожаров в оборудовании разрабатываются с учетом показателей пожаровзрывоопасности обращающихся веществ при регламентированных параметрах процесса».*

Отсюда следует, что для установления регламентируемых и регламентируемых предельно допустимых значений параметров взрывоопасного технологического процесса (а применительно к пожаровзрывоопасным технологическим процессам ОЯТЦ, соответственно, для установления эксплуатационных пределов и ПБЭ) необходимо:

– обосновать требуемую для обеспечения взрывобезопасных условий осуществления данного технологического процесса совокупность показателей пожаровзрывоопасности технологической среды (а применительно к пожаровзрывоопасным технологическим процессам ОЯТЦ – для обеспечения взрывобезопасных условий осуществления нормальной эксплуатации с учетом возможных отклонений от нормальной эксплуатации) или обосновать достаточность установления одного из показателей пожаровзрывоопасности и незначительности влияния остальных показателей пожаровзрывоопасности в условиях осуществления технологического процесса;

– определить критические значения каждого (из обоснованной совокупности) показателя пожаровзрывоопасности и, при необходимости, зависимости, существующие между критическими значениями данных показателей пожаровзрывоопасности, и зависимости, существующие между критическими значениями данных показателей пожаровзрывоопасности и значениями других параметров осуществляемого технологического процесса;

– установить необходимые диапазоны значений технологических параметров, отделяющие критические значения параметров от регламентируемых и регламентируемых предельно допустимых значений параметров (а применительно к ОЯТЦ, соответственно, отделяющие критические значения параметров от эксплуатационных пределов и ПБЭ), соблюдение которых в условиях осуществления технологического процесса и управления им обеспечивает недостижимость критических значений параметров и, следовательно, взрывобезопасность данного технологического процесса.

В общем случае к совокупности технологических параметров, которые характеризуют взрывопожароопасность технологического процесса и для которых определяют критические значения, относят:

– параметры, относящиеся к характеристикам применяемой взрывоопасной среды, а именно: состав ее основных компонентов и примесей, размер частиц для гетерогенных систем, такие как: концентрации горючего вещества, окислителя, флегматизатора (инертного вещества), диаметр (радиус) частиц;

– варьируемые параметры взрывоопасного технологического процесса, такие как: температура, давление;

– параметры, относящиеся к характеристикам технологического оборудования, такие как диаметр (радиус) аппарата, в котором находится взрывоопасная технологическая среда;

– параметры, относящиеся к энергетическим характеристикам потенциально возможных воздействий на технологическую среду при осуществлении технологического процесса, такие как энергия зажигания (воспламенения).

При этом для обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ к приведенной совокупности параметров дополнительно добавляются параметры, характеризующие ИИ, такие как доза облучения технологической среды присутствующими в ней радионуклидами, приводящая к саморазогреву технологической среды, протеканию неуправляемых химических экзотермических реакций, и способная выполнять функции источника инициирования горения и взрыва.

Критические значения показателей пожаровзрывоопасности принято называть пределами. Обычно пределы группируют по тем или иным признакам.

Например, в [69] при рассмотрении параметров горения и взрыва водородсодержащих горючих систем выделяют следующие группы пределов:

- концентрационные пределы распространения пламени;
- геометрические пределы распространения пламени;
- критические энергетические характеристики источников воспламенения.

В стандарте [32] перечень показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов, наряду с другими, включает:

- концентрационные пределы распространения пламени;
- температурные пределы распространения пламени.

В данной главе используется условное деление критических значений показателей пожаровзрывоопасности технологических процессов на:

- концентрационные пределы, характеризующие зависимость скорости протекания химической реакции от концентрации компонентов технологической среды в соответствии с законом действующих масс;
- температурные пределы, характеризующие зависимость скорости протекания химической реакции от температуры технологической среды в соответствии с уравнением Аррениуса;
- геометрические пределы, характеризующие зависимость скорости протекания химической реакции (скорости тепловыделения) от размера частиц компонентов в гетерогенной технологической среде и зависимость скорости теплоотвода от технологической среды через стенку аппарата, в которой она находится, от размера (диаметра, радиуса) этого аппарата;
- энергетические пределы, характеризующие энергию, дополнительно вводимую в технологическую среду, достаточную для инициирования горения или взрыва.

Критические значения показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов определяют предпочтительно для стандартных условий стандартными экспериментальными или расчетными методами, или в соответствии с рекомендациями нормативных документов.

Применительно к реальным условиям осуществления технологического процесса, отличным от стандартных условий, для



установления критических значений показателей пожаровзрывоопасности следует:

– обосновать применимость критических значений, полученных стандартными методами или по рекомендациям нормативных документов, для условий осуществления процесса;

– в случае непригодности использования стандартных методов и указанных рекомендаций для условий осуществления процесса – обосновать возможность и использовать специальные методы определения критических значений показателей пожаровзрывоопасности;

– учитывать зависимости, существующие между критическими значениями разных показателей пожаровзрывоопасности друг с другом и значениями других параметров технологического процесса (например, скоростей смешивания или перемешивания компонентов технологической среды).

Кроме того, при оценке критических значений показателей пожаровзрывоопасности радиохимических технологических сред ОЯТЦ (вследствие экспериментальных сложностей при их определении) следует учитывать результаты опыта обеспечения ПВБ ОЯТЦ для аналогичных технологических процессов при проведении испытаний и в промышленном масштабе.

## **6.2. Уровни критических значений параметров**

Поскольку основную опасность на ОЯТЦ представляют взрывы радиационно-химических сред, обусловленные нарушениями, допущенными при нормальной эксплуатации, то для обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ в первую очередь возникает потребность в определении критических значений показателей пожаровзрывоопасности, относящихся к химико-технологическим процессам.

Взрывы технологических сред могут происходить на ОЯТЦ как в результате возникновения пожара, то есть в совокупности с процессами горения, так и непосредственно – без предварительной стадии горения. В первом случае причинами взрыва могут быть или самовоспламенение взрывоопасной среды, или воздействие на нее источника зажигания, а во втором – воздействие источника инициирования взрыва.

В связи с этим следует учитывать, что установление необходимой совокупности показателей пожаровзрывоопасности и определение их критических значений для конкретного химико-технологического процесса зависят от характерных особенностей протекания потенциально возможного взрывчатого превращения.

В [69] выделяют следующие взрывоопасные режимы протекания химических реакций:

- режим медленного горения – относительно медленное горение со скоростью меньшей, чем скорость звука в смеси реагентов;
- режим быстрой дефлаграции – относительно быстрое горение со скоростью в интервале между скоростью звука в смеси реагентов и скоростью звука в продуктах сгорания;
- режим квазидетонации и детонации – взрывное превращение со скоростью, большей скорости звука в продуктах сгорания.

Для данных режимов в [69] приведены следующие типичные значения скоростей горения и взрыва, предшествующие детонации:

- слабый турбулентный дефлаграционный режим со скоростью несколько десятков метров в секунду для бедных смесей (с малым содержанием горючего компонента);
- быстрое дефлаграционное горение со скоростями 800–1 000 м/с, в котором фронт горения распространяется с местной скоростью звука относительно продуктов реакции;
- квазидетонационное горение со скоростями, превышающими 1 100 м/с, но на 200–500 м/с меньшими, чем соответствующие скорости детонации.

В [69] отмечены также следующие явления, приводящие к развитию взрывных процессов в системе водород – кислород (воздух), обусловленные ускорением горения:

- если процесс горения инициируется маломощным источником зажигания (электрической искрой), начальной стадией будет ламинарное пламя в том случае, когда параметры смеси находятся в пределах области воспламенения; скорость распространения ламинарного пламени является функцией скорости химической реакции, теплопроводности и энерговыделения; типичные скорости ламинарного пламени в водородсодержащих смесях составляют несколько метров в секунду, что гораздо меньше скорости звука; рост давления в таком процессе можно считать квазистатическим;

– если горение инициируется у закрытого конца объема, содержащего взрывоопасную смесь, то скорость распространения пламени определяется скоростью горения и степенью расширения продуктов сгорания; расширение продуктов сгорания обуславливает возникновение газовых потоков и волн сжатия перед фронтом пламени, что ведет к образованию вихрей и турбулентности; в результате возрастает поверхность фронта пламени и скорость горения, усиливаются волны сжатия, что может привести к формированию ударной волны перед фронтом; таким образом, механизм ускорения обусловлен положительной обратной связью между газовыми потоками, генерируемыми пламенем и самим пламенем; при достижении скорости звука в продуктах пламени отличаются максимально возможной скоростью распространения турбулентного горения (типичные значения скоростей 600–1 000 м/с);

– дальнейший рост скорости пламени имеет место при переходе горения в детонацию; самовоспламенение сжатой смеси позади фронта ударной волны становится основным процессом, обеспечивающим распространение волны горения; типичные значения скорости детонации, зависящей от состава смеси и начальных условий, составляют 1 000–2 000 м/с;

– если имеется способная к детонации смесь, возможно прямое инициирование детонации внешним источником энергии (искрой или мощным взрывом);

– пиковые значения давления, когда скорость распространения пламени сравнима со скоростью звука в смеси составляет 6–8 бар; в случае перехода горения в детонацию можно ожидать пиковые значения давления с уровнем до 20–25 бар.

В [10] приводятся следующие характеристики взрывчатых превращений:

– наиболее быстрой формой протекания взрывного превращения является детонация; детонация есть гидродинамический волновой процесс распространения по веществу зоны экзотермической реакции со сверхзвуковой скоростью; детонационная волна характеризуется высокими давлениями, лежащими в интервале 20–400 кбар для конденсированных (жидких и твердых) взрывчатых веществ и 15–40 кбар для газовых взрывчатых смесей; при повышении начального давления взрывчатых газов, а также при использовании гетерогенных взрывчатых систем можно получать и промежуточные давления детонации; значения идеальной

скорости детонации (когда она становится независимой от диаметра оболочки) для конденсированных взрывчатых веществ лежит в интервале от 2 до 9 км/с, для газов – от 1,5 до 3,5 км/с;

– гораздо более медленный процесс распространения зоны химической реакции – нормальное (послойное) горение; скорость фронта пламени (области горения, испускающей свет) относительно исходного вещества всегда дозвуковая; в газовых смесях фронт нормального горения (ламинарное пламя) распространяется со скоростями от десятков сантиметров до десятка метров в секунду; при турбулизации газового потока скорость горения, которое называют турбулентным, и эффективная толщина его фронта возрастают за счет конвективного переноса пламени местными пульсационными течениями; значения скорости послойного горения в конденсированных веществах лежат в интервале от долей миллиметра в секунду до сантиметров в секунду; в пористых системах горячие газы продавливаются внутрь пор, резко увеличивая эффективную поверхность горения, формируя режим конвективного горения пористых систем, при котором достигаются скорости конвективного горения, приближающиеся к 1 км/с;

– начальная стадия развития экзотермической реакции в некотором объеме вещества, завершающаяся резким ростом температуры за счет тепловыделения и появлением пламени, носит название воспламенения; различают самовоспламенение, возникающее за счет самопроизвольных внутренних процессов и вынужденное воспламенение (зажигание), производимое с помощью постороннего источника; если можно пренебречь теплообменом с окружающей средой, говорят об адиабатическом воспламенении; воспламенение и горение частиц вещества присутствуют в качестве внутренних процессов в механизме детонационного превращения;

– явление взрыва может осуществляться по механизму как детонации, так и быстрого горения; в наиболее типичных случаях взрыв связан со значительным разогревом вещества в очаге взрыва и превращением его в газ или плазму высокого давления, которые, расширяясь, совершают механическую работу.

В связи с приведенными характеристиками возможных стадий взрывчатых превращений требуются пояснения по поводу того, каким образом происходит самопроизвольный (без дополнительного воздействия источника энергии) переход от режима горения к режиму взрыва.

Согласно [69] достаточно полной модели, описывающей все стадии процесса перехода горения в детонацию, в настоящее время не создано. К основным условиям, определяющим возможность перехода горения в детонацию, относятся следующие:

- горючая смесь (по составу, геометрическим характеристикам, начальным термодинамическим параметрам) должна быть способна поддерживать незатухающее распространение детонации;

- должен действовать механизм ускорения пламени (при горении однородной смеси);

- должна иметься возможность быстрого формирования детонационной волны при самовоспламенении неоднородной смеси. К наиболее эффективному механизму ускорения пламени в [69] относят развитие крупномасштабных искривлений фронта горения вследствие:

- многократного взаимодействия турбулентного фронта горения с возмущениями давления (например, в гладких трубах);

- взаимодействие пламени с периодически расположенными крупномасштабными препятствиями.

Механизм быстрого формирования детонационной волны при самовоспламенении неоднородной смеси связан с наличием градиента времени индукции в реагирующей смеси [69], при этом:

- быстрое усиление волны давления происходит при синхронизации выделения химической энергии и газодинамических процессов;

- в отличие от ударного инициирования, отсутствует стадия пересжатой детонации, а выход на детонационный режим осуществляется в результате усиления слабой волны;

- необходимая неоднородность смеси в аварийных условиях может образоваться в результате локального нагрева смеси, малых добавок активных веществ, турбулентного истечения горячих газов и продуктов горения (например, наблюдалось аномально быстрое развитие взрыва в высокочувствительных смесях  $H_2 - Cl_2$ ,  $H_2 - O_2$  добавками  $Cl_2$  в результате неоднородного распределения концентрации свободных радикалов при ультрафиолетовом облучении смеси).

В [69] отмечено также увеличение вероятности перехода горения в детонацию при увеличении геометрических размеров смеси, а именно, что:

- вероятность спонтанного возникновения взрывных процессов возрастает с увеличением объема взрывоопасной смеси;

– увеличение геометрических размеров взрывоопасной смеси ведет к расширению концентрационных пределов перехода горения в детонацию.

Что касается начальной стадии взрывчатых превращений, то при оценке условий самовоспламенения пожаровзрывоопасных смесей необходимо также учитывать разновидности теплового и цепного воспламенения.

В [121] в дополнениях редактора Д. А. Франк-Каменецким приведены следующие понятия теплового и цепного воспламенения:

– критическое условие воспламенения есть условие перехода от стационарного к нестационарному протеканию реакции; под стационарным режимом реакции подразумевается такой, когда концентрация активных промежуточных продуктов и разогрев реагирующей смеси сохраняют малые квазистационарные значения, изменяющиеся лишь в меру изменения концентрации исходных веществ;

– если при некоторых значениях внешних параметров (температура, давление) квазистационарные концентрации активных промежуточных продуктов становятся невозможными (или неустойчивыми) и концентрации их начинают возрастать, то это явление носит название цепного воспламенения;

– если стационарный разогрев становится невозможным и температура реагирующей смеси начинает возрастать существенно нестационарным образом, то это явление носит название теплового воспламенения;

– условие теплового воспламенения, согласно Франк-Каменецкому, может быть представлено в виде критического значения безразмерной величины:

$$\delta = (Q/\lambda) (E/RT_0) r^2 W \quad (24)$$

где:  $Q$  – тепловой эффект реакции;

$E$  – энергия активации;

$R$  – универсальная газовая постоянная;

$\lambda$  – теплопроводность реагирующей смеси;

$T_0$  – температура стенок реакционного сосуда;

$r$  – радиус сосуда;

$W$  – скорость реакции при температуре  $T_0$ ;

– критические значения безразмерной величины равны: 3,32 для сферического сосуда и  $2,00 + 0,843 (d/L)^2$  для цилиндрического сосуда длины  $L$  и диаметра  $d$ ;

– если на пределе воспламенения величина  $\delta$  достигает указанных критических значений, то воспламенение имеет тепловую природу; если воспламенение происходит при значениях  $\delta$  меньше критических, то это служит указанием на цепной характер воспламенения;

– при высоких давлениях и больших размерах сосуда, когда становится существенной свободная конвекция, воспламенение может происходить и при более высоких значениях  $\delta$ ;

– с цепным воспламенением приходится встречаться, главным образом, при сравнительно низких давлениях; большинство случаев воспламенения при атмосферном или более высоком давлении, представляющих наибольший практический интерес, имеют тепловую природу.

Из рассмотренных выше характеристик режимов взрывчатых превращений следует, что установление критических значений технологических параметров, необходимых для принятия мер по предотвращению собственно взрывоопасности технологических процессов, затруднено недостаточно четким проведением понятийной границы между горением и взрывом пожаровзрывоопасной технологической среды.

Согласно приведенным сведениям существует точка зрения, по которой взрыв представляет собой определенные стадии горения: дефлаграционного и детонационного.

Действительно, взрыву предшествуют стадии дефлаграционного и детонационного горения, то есть стадии определенного режима движения (формирования) фронта горения.

Вместе с тем под взрывом можно понимать необратимый процесс разрушения фронта горения (как дефлаграционного, так и детонационного) в результате достижения критического по величине для данных условий перепада давления между газообразными продуктами реакции во фронте горения и окружающей средой.

Образуемый таким образом срыв дефлаграционного горения допустимо тогда считать взрывом (дефлаграционным взрывом); срыв детонационного горения – детонацией (детонационным взрывом),

а, соответственно, стадии дефлаграционного и детонационного горения – предшествующими стадиями взрыва и детонации.

Тогда в упрощенном виде возможные случаи перехода реакции в режим взрыва в первом приближении можно оценить на основании анализа уравнения состояния идеального газа, справедливого при не очень больших давлениях в реакционной системе:

$$\Delta P = (1/\Delta V) (\Delta n) R (\Delta T) \quad (25)$$

Так, в [69] отмечено, что температуру, давление и состав продуктов сгорания смесей, содержащих водород, можно оценивать по уравнению состояния идеального газа вплоть до уровня давления 50 МПа.

Согласно приведенному уравнению состояния идеального газа скачок давления ( $\Delta P$ ) в ходе самовоспламенения и горения пожаровзрывоопасной смеси может быть обусловлен:

– резким изменением количества газообразных компонентов ( $\Delta n$ ) в ходе протекания реакции при небольшом изменении температуры и при постоянном объеме смеси, что может соответствовать развитию процесса в ходе цепного воспламенения (протекания разветвленных цепных реакций) и возникновения цепного взрыва;

– резким изменением температуры ( $\Delta T$ ) реакционной смеси в ходе протекания реакции при небольшом изменении количества газообразных компонентов и при постоянном объеме смеси, что может соответствовать развитию процесса в ходе теплового воспламенения и начальной стадии теплового взрыва;

– совместным резким изменением температуры ( $\Delta T$ ) и количества газообразных компонентов ( $\Delta n$ ) при постоянном объеме смеси, что может соответствовать развитию процесса в ходе тепло-цепного воспламенения, приводящего к теплового взрыву;

– резкому изменению объема смеси ( $\Delta V$ ) при небольших изменениях ( $\Delta n$ ) и ( $\Delta T$ ) при нарушении герметичности сосуда, находящегося под давлением, что может соответствовать физическому взрыву без существенного протекания химической реакции.

Такая трактовка взрыва позволяет выделить применительно к нормативному регулированию взрывобезопасности ОЯТЦ три основных режима самопроизвольного (без воздействия дополнительного источника энергии) протекания химических реакций, представляющих



пожаровзрывоопасность, для которых следует устанавливать совокупности показателей пожаровзрывоопасности и определять для каждого из них собственные критические значения:

- самовоспламенение (предшествующее взрыву);
- взрыв (дефлаграционный взрыв);
- детонация (детонационный взрыв с наиболее тяжелыми последствиями по сравнению с дефлаграционным взрывом).

В соответствии с этим в общем виде для предотвращения взрывоопасности технологических процессов и снижения последствий взрывов можно выделить три уровня критических значений технологических параметров, относящихся к:

- неконтролируемому самовоспламенению пожаровзрывоопасной среды или ее воспламенению в результате воздействия источника зажигания;
- неконтролируемому взрыву пожаровзрывоопасной или взрывоопасной среды, в том числе в результате ее неконтролируемого горения или воздействия источника инициирования взрыва;
- неконтролируемой детонации пожаровзрывоопасной или взрывоопасной среды в результате развития дефлаграционного взрыва или воздействия мощного источника инициирования детонации.

Таким образом, в общем виде формируются три уровня пределов для пожаровзрывоопасных и взрывоопасных технологических сред:

- пределы самовоспламенения;
- пределы взрываемости;
- пределы детонации.

Их взаимное расположение в общем виде соответствует следующей последовательности: ближе всего к регламентируемым значениям технологических параметров (эксплуатационным пределам для ОЯТЦ) располагаются пределы самовоспламенения, за ними – пределы взрываемости и еще дальше – пределы детонации.

Итак, можно выделить два основных варианта возникновения химического взрыва:

- протекание химической реакции между двумя или большим числом реагентов при последовательной смене режима горения на режим взрыва в результате ускорения скорости реакции;

– непосредственное формирование режима взрыва в случае протекания реакции разложения химического соединения в результате воздействия на него источника инициирования взрыва.

В первом случае значения технологических параметров проходят из пожаровзрывобезопасной области через область горения (самовоспламенения) в область взрыва и далее при наличии достаточного энергетического потенциала – в область детонации.

Во втором случае значения технологических параметров непосредственно переходят из безопасной области в область взрываемости и (или) в область детонации.

В связи с этим в требованиях п. 3.14 [2] приведено, что критические значения, в том числе, включают область взрываемости.

В общем виде характер взаимного расположения границ критических значений технологических параметров показан на рис. 45 и 46.

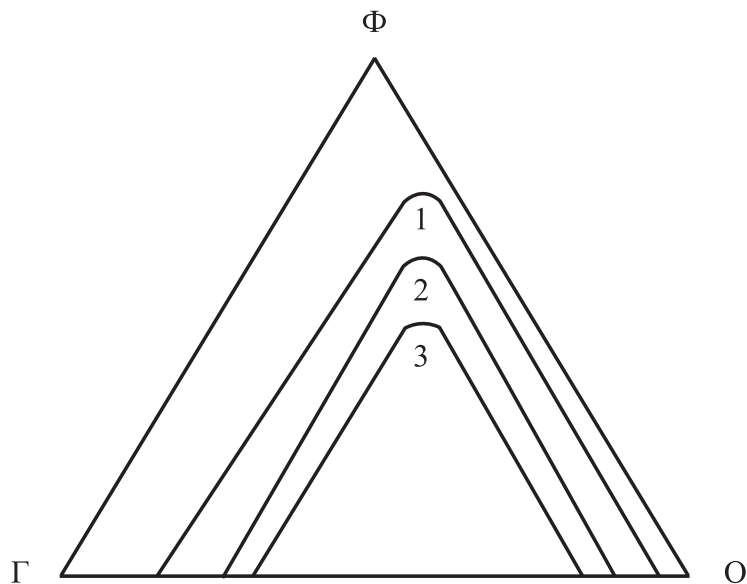


Рис. 45. Взаимное расположение областей самовоспламенения (1), взрываемости (2), детонации (3) в системе горючее ( $\Gamma$ ) – окислитель ( $O$ ) – флегматизатор ( $\Phi$ ) на концентрационной диаграмме

В качестве примера на рис. 45 показана трехуровневая структура критических значений параметров технологической среды, состоящая из концентрационных границ областей самовоспламенения взрывоопасной смеси (1), взрываемости или дефлаграционного горения (2), детонации (3) и взрывобезопасной области (2), в которой исключены условия возникновения самопроизвольного горения и взрыва данной технологической среды.

Концентрационная диаграмма на рис. 45 представляет собой тройную диаграмму, компонентами которой являются: горючее (взрывчатое) вещество (Г) и окислитель (О), которые образуют взрывоопасную смесь, и флегматизирующая добавка или инертное вещество (Ф). Она применима для фиксированных значений остальных технологических параметров, характеризующих взрывопожароопасность данной технологической среды.

В приведенном примере область детонации находится внутри области взрываемости, а та внутри области самовоспламенения взрывоопасной смеси. При этом область детонации охватывает диапазон концентраций окислителя и восстановителя, более близкий к их стехиометрическому количеству по уравнению реакции. Соответственно, для областей взрываемости и самовоспламенения диапазон значений концентраций последовательно расширяется.

Вследствие этого для исключения возможности детонации требуется меньшее количество флегматизатора, чем для исключения возможности взрыва, а для исключения возможности взрыва – меньшее количество флегматизатора, чем для исключения возможности самовоспламенения взрывоопасной смеси. За пределами границ области самовоспламенения горение технологической среды при отсутствии источника зажигания становится невозможным.

Представленный на рис. 45 характер взаимного расположения областей самовоспламенения, взрываемости и детонации на концентрационной диаграмме соответствует известным данным для системы водород – воздух – вода (диаграмма Шапиро – Моффети [34]).

Аналогичный тип концентрационных диаграмм для области детонации отмечен в работе [34] применительно к экстракционным и сорбционным системам:

- экстрагент ТБФ – азотная кислота – вода;
- анионит ВП-1АП в нитратной форме – азотная кислота – вода;

– катионит КУ-2 – азотная кислота – вода.

На рис. 46 показана трехуровневая структура критических значений параметров технологической среды на примере диаграммы трех пределов для газовых систем с координатами: давление – температура газовой смеси. Она также применима для фиксированных значений остальных технологических параметров, характеризующих взрывопожароопасность данной технологической среды.

Такое взаимное расположение границ режимов самовоспламенения и взрыва описано в работе [29] применительно к трем пределам взрываемости в системах водород – кислород и водород – сера.

Как следует из рис. 46, границы областей самовоспламенения, взрываемости и детонации в первом приближении представляют собой однотипные кривые, расположенные на некотором расстоянии друг от друга. Границы области самовоспламенения соответствуют более низким значениям температуры и давления по сравнению с границами области взрываемости, а область детонации – при более высоких значениях температуры и давления.

Как и в приведенном выше примере, в рассматриваемых на рис. 46 диапазонах изменения параметров область детонации (3) находится внутри области взрываемости (2), а также внутри области самовоспламенения взрывоопасной смеси (1). Взрывобезопасной области (4) соответствуют более низкие значения температуры и давления.

Помимо рассмотренной обобщенной трехуровневой структуры критических значений параметров технологической среды возможны варианты, в которых некоторые из рассмотренных уровней отсутствуют.

Так, при наличии источника инициирования взрыва взрывчатое вещество способно непосредственно к взрывчатому превращению в режиме дефлаграционного взрыва или в режиме детонации.

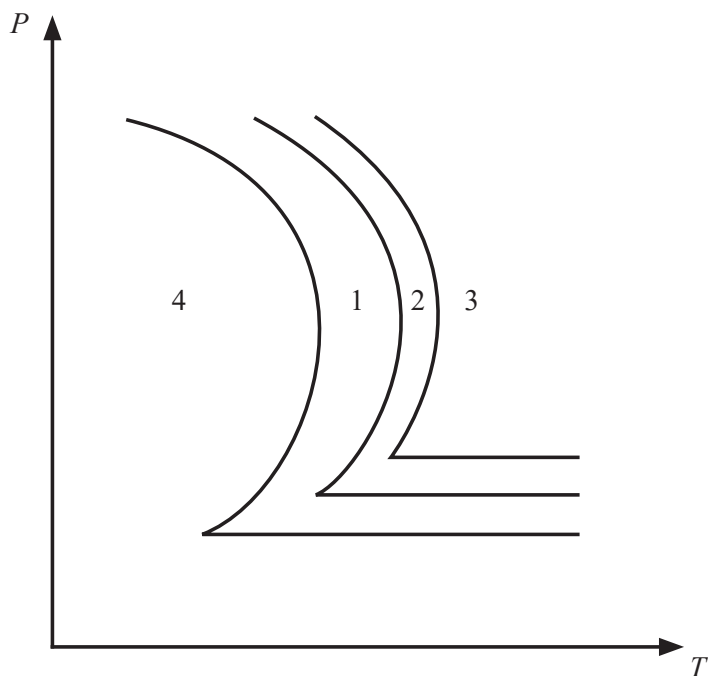


Рис. 46. Взаимное расположение областей самовоспламенения (1), взрываемости (2), детонации (3) и взрывобезопасной области (4) на диаграмме трех пределов для газовых систем

Эволюция типов пределов взрываемости по мере увеличения взрывопожароопасности веществ и материалов показана на рис. 47 на примере концентрационных диаграмм.

На первом типе диаграмм на рис. 47 приведена только область самовоспламенения. В этом случае или энергетический потенциал системы недостаточен для перехода горения в режим взрыва, или в системе не образуются газообразные продукты, приводящие к взрыву.

На втором типе диаграмм внутри области самовоспламенения взрывоопасной смеси появляется область взрываемости, но энергетического потенциала реакционной системы еще недостаточно для перехода реакции в режим детонации.

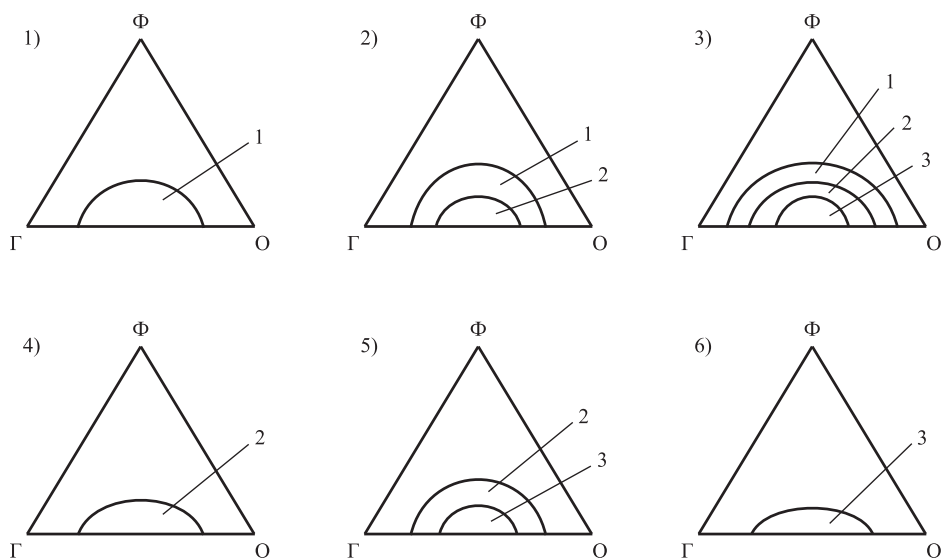


Рис. 47. Типы концентрационных диаграмм в системах: 1) горючее (Г) – окислитель (О) – флегматизатор (Ф); 2) взрывчатое вещество (В) – флегматизатор (Ф)

На третьем типе диаграмм показана рассмотренная выше возможность последовательного перехода реакции в режимы самовоспламенения и горения, взрыва и детонации. При этом с увеличением содержания флегматизатора сужаются диапазоны концентраций для областей самовоспламенения, взрыва, детонации вплоть до исключения возможности реакционной системы в начале детонировать, затем взрываться и, наконец, гореть при отсутствии источника зажигания.

Четвертый тип диаграмм соответствует второму типу применительно к случаю, когда или границы областей самовоспламенения и взрываемости находятся настолько близко друг к другу, что практически можно исходить из наличия для данной реакционной системы только области взрываемости, или область самовоспламенения отсутствует.

Аналогичным образом на пятом типе диаграмм представлены области взрываемости и детонации при практическом отсутствии области самовоспламенения.

Шестой тип диаграмм соответствует случаю, когда и границы области самовоспламенения, и границы области взрываемости практически совпадают с границей области детонации. В этом случае реакционная смесь при достижении критических значений будет сразу детонировать.

Так же как и для концентрационных диаграмм, для диаграмм трех пределов взрываемости можно выделить аналогичные разновидности, связанные с количеством и взаимным расположением областей самовоспламенения, взрываемости и детонации.

При достижении границ рассматриваемых областей самовоспламенения, взрыв или детонация происходят не мгновенно, а по истечении некоторого времени, необходимого для ускорения реакции – периода индукции. На самих границах значения периодов индукции принимают равными бесконечности. При переходе через указанные границы значения периодов индукции резко снижаются по мере изменения значений параметров, определяющих границы этих областей.

Взаимосвязь между значениями параметров взрывоопасности, соответствующими границам и области самовоспламенения (или, соответственно, взрываемости) и периодом индукции до начала самовоспламенения (взрываемости) взрывоопасной технологической среды, показаны на рис. 48 на примере концентрационной диаграммы.

Согласно рис. 48 для содержания в реакционной системе определенного количества флегматизатора (линия I–I) ВКПВ и НКПВ будут достигнуты, соответственно, в точках 1 и 2. При данных составах технологической среды период индукции будет приближаться к бесконечности (нижний график на рис. 48). При переходе из точки 1 в точку 3, то есть при увеличении содержания окислителя, период индукции снизится до значения  $\tau_2$ .

Если технологическая среда, состав которой соответствует точке 3 на тройной концентрационной диаграмме, превысит данное значение, то произойдет ее самовоспламенение (взрыв).

За более короткое время можно, если позволяют технические средства (системы безопасности), выйти из опасной области и предотвратить самовоспламенение (взрыв).

На основании изложенного выше можно заключить, что под критическими значениями параметров технологической среды при осуществлении взрывоопасных технологических процессов следует понимать в первую очередь границы области самовоспламенения

взрывоопасной смеси, нарушение которых может привести к достижению границ области взрываемости и, соответственно, к взрыву. Для взрывчатых веществ критическими значениями технологических параметров непосредственно являются границы области взрываемости.

В связи с этим с целью обобщения в следующих разделах в качестве критических значений будут рассматриваться границы области самовоспламенения взрывоопасной смеси.

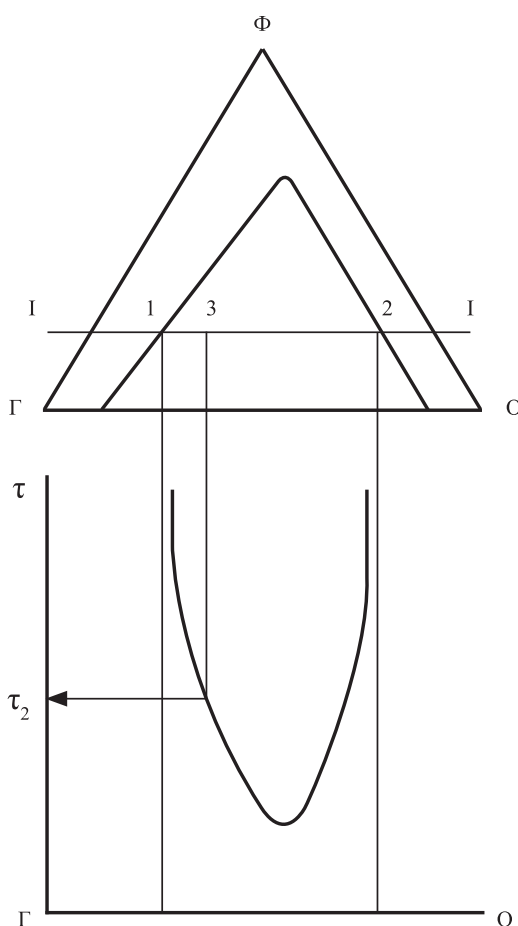


Рис. 48. Взаимосвязь между критическими значениями параметров пожаровзрывоопасности и периодом индукции взрывчатого превращения



### 6.3. Концентрационные пределы

Возникновение взрыва в технологической среде связано с ускорением взрывоопасной химической реакции и переходом ее в режим взрыва или детонации. В свою очередь, скорость химической реакции при данной температуре зависит от концентрации реагентов и их соотношений в соответствии с законом действующих масс. Таким образом, состав взрывоопасной технологической среды в значительной мере определяет возможность возникновения в ней взрыва при осуществлении технологического процесса.

К стандартным показателям пожаровзрывоопасности веществ и материалов, характеризующих состав взрывоопасных технологических сред, согласно [1, 32], относятся:

- НКПВ и ВКПВ;
- минимальное взрывоопасное содержание кислорода;
- минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора.

Определения этих показателей пожаровзрывоопасности, данные в [32], приведены в табл. № 16.

Таблица № 16

#### Определения концентрационных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов

№ п/п	Определение
1	Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени – минимальное (максимальное) содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания
2	Минимальное взрывоопасное содержание кислорода – такая концентрация кислорода в горючей смеси, состоящей из горючего вещества, воздуха и флегматизатора, меньше которой распространение пламени в смеси становится невозможным при любой концентрации горючего в смеси, разбавленной данным флегматизатором
3	Минимальная флегматизирующая концентрация – наименьшая концентрация флегматизатора в смеси с горючим и окислителем, при

№ п/п	Определение
	которой смесь становится неспособной к распространению пламени при любом соотношении горючего и окислителя

Из определения концентрационных пределов распространения пламени следует, что:

– данный показатель пожаровзрывоопасности применим к смесям горючее вещество – окислительная среда;

– НКПВ обусловлен снижением скорости реакции между горючим веществом и окислителем до критического значения при увеличении избытка окислителя в реакционной системе;

– соответственно, ВКПВ обусловлен снижением скорости реакции между горючим веществом и окислителем до критического значения при увеличении избытка восстановителя в реакционной смеси;

– окислительная среда содержит окислитель и один или несколько других компонентов, не участвующих в химической реакции между горючим веществом и окислителем, но может содержать и несколько окислителей, в том числе в виде примесей, инициирующих протекание основной реакции окисления;

– НКПВ достигается при увеличении содержания в смеси горючее вещество – окислитель количества горючего вещества;

– ВКПВ достигается при увеличении содержания в смеси горючее вещество – окислитель количества окислителя;

– НКПВ и ВКПВ могут сближаться до совпадения при постоянном составе окислительной среды: при постоянном соотношении в ней окислителя и других компонентов окислительной среды, не участвующих в химической реакции между горючим веществом и окислителем;

– для составов смеси горючее вещество – окислительная среда, находящихся между НКПВ и ВКПВ, возможно распространение пламени по смеси при ее воспламенении на любое расстояние от источника зажигания для условий, при которых были определены концентрационные пределы (температуры, давления, диаметра реакционного сосуда, открытый или закрытый тигель и др.);

– для составов смеси горючее вещество – окислительная среда, находящихся за НКПВ и ВКПВ, невозможно распространение пламени по

смеси при ее воспламенении на любое расстояние от источника зажигания для условий, при которых были определены концентрационные пределы;

– распространение пламени по смеси горючее вещество – окислительная среда при ее воспламенении на любое расстояние от источника зажигания означает, что после затухания энергетического воздействия источника зажигания (снижения вклада этого энергетического воздействия до нуля) распространение пламени по смеси происходит за счет теплового эффекта реакции во фронте горения смеси на всем пути его распространения (по всему объему имеющейся смеси);

– энергия (мощность) источника зажигания должна превышать критическое значение, необходимое для воспламенения данной смеси горючее вещество – окислительная среда;

– за областью концентраций, ограниченной пределами распространения пламени, могут находиться диапазоны концентраций горючего вещества и окислителя, для которых возможно воспламенение и распространение пламени на ограниченное расстояние от источника зажигания и для которых возможно воспламенение смеси без распространения пламени от источника зажигания.

Согласно определению минимального взрывоопасного содержания кислорода данный показатель пожаровзрывоопасности означает, что:

– показатель применяется для горючей смеси: кислород – горючее вещество – флегматизатор;

– взрывоопасность кислорода определяется возможностью воспламенения и горения этой горючей смеси;

– при уменьшении концентрации кислорода в горючей смеси кислород – горючее вещество – флегматизатор ниже минимального взрывоопасного содержания кислорода воспламенение и горение данной смеси становится невозможным применительно к условиям определения этого показателя пожаровзрывоопасности (температуры, давления, диаметра реакционного сосуда, энергии зажигания) даже при полном отсутствии флегматизатора;

– при увеличении концентрации кислорода в горючей смеси кислород – горючее вещество – флегматизатор выше минимального взрывоопасного содержания кислорода воспламенение или воспламенение и горение данной смеси, в том числе сопровождающееся возникновением взрыва, становится возможным как в условиях определения этого показателя пожаровзрывоопасности для определенных соотношений

концентраций горючего вещества и флегматизатора, так и для других условий обращения с данной горючей смесью (для других ее состояний).

Как следует из определения минимальной флегматизирующей концентрации:

– этот показатель пожаровзрывоопасности применяется к смеси: горючее вещество – окислительная среда (содержащая окислитель и компоненты, не участвующие в реакции окисления, например, азот в воздухе) – флегматизатор (например, в случае применения воздуха – аргон);

– при концентрации флегматизатора в смеси меньше минимальной флегматизирующей концентрации данная смесь может быть способна к воспламенению и распространению пламени при определенных соотношениях горючего и окислительной среды и при условиях, отличных от условий определения минимальной флегматизирующей концентрации;

– при концентрации флегматизатора в смеси больше минимальной флегматизирующей концентрации данная смесь не способна к воспламенению и распространению пламени применительно к данным условиям определения минимальной флегматизирующей концентрации (температуре, давлению, диаметру сосуда, энергии источника зажигания).

В [69, 121] приведены следующие общие сведения о концентрационных пределах распространения пламени:

– при повышении температуры пожаровзрывоопасной смеси диапазон концентраций между НКПВ и ВКПВ расширяется, а при понижении температуры, соответственно, снижается вплоть до совпадения пределов при критическом значении температуры, ниже которой самопроизвольное распространение пламени по данной смеси становится невозможным;

– диапазон концентраций между НКПВ и ВКПВ сужается при увеличении в смеси количества флегматизатора (инертного вещества) вплоть до совпадения пределов при критическом значении содержания флегматизатора в смеси; при большем содержании флегматизатора распространение пламени становится невозможным;

– диапазон концентраций между НКПВ и ВКПВ обычно расширяется при увеличении диаметра сосуда, в котором находится пожаровзрывоопасная смесь, до значений порядка 5 см; дальнейшее увеличение диаметра сосуда, как правило (но имеются исключения), незначительно влияет на изменение НКПВ и ВКПВ;

– перемешивание пожаровзрывоопасной смеси (например, с помощью вентилятора) приводит к некоторому расширению диапазона концентрации между НКПВ и ВКПВ;

– диапазон концентраций между НКПВ и ВКПВ всегда шире при зажигании пожаровзрывоопасной смеси в нижней части вертикального сосуда, в котором находится смесь, по сравнению с зажиганием в верхней части этого сосуда; при зажигании пожаровзрывоопасной смеси в горизонтальных трубках значения концентрационных пределов распространения пламени находятся между соответствующими значениями, полученными при распространении пламени для этой смеси вверх или вниз внутри вертикального сосуда;

– обычно НКПВ для пожаровзрывоопасных смесей, содержащих воздух или кислород, близки между собой, а ВКПВ в кислородсодержащих смесях выше, чем в смесях, содержащих воздух.

Применительно к смесям водорода с воздухом, представляющим особую взрывоопасность для ОЯТЦ вследствие образования радиолитического водорода, в [69] приведены следующие сведения:

– НКПВ и ВКПВ смесей водород – воздух с ростом температуры изменяются практически линейно в интервале температур 25–400 °С (с 4 % при 25 °С до менее 2 % при 400 °С для НКПВ);

– увеличение начального давления для смеси водород – кислород – азот несколько сокращает область горючести; максимальное количество азота, которое подавляет горение всех составов при температуре 523 К (250 °С), составляет 93 % азота при давлении 2 МПа; наряду с этим происходит увеличение предельной концентрации водорода с 2 % при 0,1 МПа до 4,5 % при 2 МПа;

– в стехиометрических смесях предельное содержание разбавителя (азота) меньше, чем в «носовой» точке концентрационной диаграммы системы водород – кислород – азот, а предельное содержание водорода больше, что связано с высокой диффузионной способностью горючего компонента смеси (водорода), находящегося в недостатке по сравнению со стехиометрией реакции;

– уменьшение температуры стехиометрической смеси водород – кислород – азот с 523 К (250 °С) до 423 К (150 °С) и 273 К (0 °С) приводит в интервале давлений 0,1–2,5 МПа к росту предельной концентрации водорода (согласно приведенному в [10] рис.) примерно на 1 и 2,5 % соответственно.

Специфика поведения примесей, присутствующих в смесях водорода и кислорода, и их влияние на концентрационные пределы распространения пламени изложена в [121] и заключается в следующем:

– небольшие следы диоксида азота могут вызвать взрыв смеси водорода с кислородом даже при температурах, при которых эти газы сами по себе совершенно инертны по отношению друг к другу; для каждой такой температуры существуют две строго определенные критические концентрации диоксида азота, между которыми происходит немедленное воспламенение смеси водорода с кислородом, но выше и ниже которых наблюдается только крайне медленная реакция;

– для стехиометрической смеси водорода и кислорода около 400 °С нижняя критическая концентрация диоксида азота имеет величину порядка 0,1 мм рт. ст., а верхняя критическая концентрация – порядка нескольких мм рт. ст.;

– при постоянной температуре и составе смеси нижняя критическая концентрация диоксида азота растет, а его верхняя критическая концентрация падает с возрастанием общего давления водорода и кислорода;

– если общее давление газовой смеси поддерживается постоянным, верхняя критическая концентрация диоксида азота понижается с ростом отношения парциального давления кислорода в смеси к парциальному давлению водорода;

– верхняя критическая концентрация диоксида азота понижается также благодаря присутствию в смеси водород – кислород азота;

– возрастание температуры понижает нижнюю критическую концентрацию диоксида азота в смеси водород – кислород и повышает его верхнюю критическую концентрацию;

– влияние общего давления в смеси водород – кислород на нижнюю критическую концентрацию диоксида азота с понижением температуры становится менее отчетливым;

– верхняя критическая концентрация диоксида азота остается той же при нахождении смеси водорода с кислородом как в кварцевом, так и в фарфоровых сосудах;

– для аммиака и циана, так же как и для диоксида азота, характерно наличие нижней и верхней взрывных концентраций при их нахождении в смеси водорода и кислорода;

– введение малых количеств свободных атомов водорода, полученных в разрядной трубке, или свободных атомов кислорода, полученных фотохимическим способом, непосредственно в смесь водорода с кислородом расширяет область ее воспламенения, и тем больше, чем больше концентрация свободных атомов водорода и кислорода;

– небольшие количества йода, иодида водорода или алкилиодидов, диссоциирующих с выделением атомарного йода, заметно подавляют реакцию между водородом и кислородом.

Ниже приведены следующие сведения о концентрационных пределах детонации смесей водорода с воздухом, о которых сообщается в [69].

Концентрационные пределы детонации смесей водорода с воздухом зависят от:

- мощности взрывного устройства;
- геометрических размеров смеси;
- начальных условий (например, температуры смеси).

Диапазон концентраций, при которых детонация способна распространяться в смеси, расширяется при:

- увеличении веса иницирующего заряда;
- увеличении геометрических размеров смеси;
- повышении температуры и давления смеси.

Ранее полагали, что:

– концентрационные пределы детонации смесей водорода с воздухом заключены в интервале от 18,2 до 58,9 % водорода (с пределами горения от 4 до 75 %);

– подавление детонации в стехиометрической смеси происходит при ее разбавлении водяным паром свыше 30 % (подавление горения при добавлении водяного пара более 55 %).

Измерения на крупномасштабных установках показали расширение пределов детонации смесей водорода с воздухом (от 9,4 до 76,9 % водорода) и повышение концентрации водяного пара, необходимого для подавления детонации, приблизительно до 39 %.

Типичный вид границы области самовоспламенения, в зависимости от концентраций горючего, окислителя и флегматизатора, в технологической среде показан на верхнем графике рис. 48, на котором изображено взаимное расположение НКПВ и ВКПВ и минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора.

Как видно из рис. 48, с увеличением содержания флегматизатора в смеси с горючим и окислителем диапазон концентраций между НКПВ и ВКПВ уменьшается и при достижении минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора становится равным нулю. При большей концентрации флегматизатора самовоспламенение в данной реакционной системе становится невозможным.

Приведенная зависимость изменения критических значений воспламенения от соотношения концентраций горючего, окислителя и флегматизатора соответствует постоянным значениям других параметров, влияющих на воспламенение.

Стандартные значения концентрационных показателей пожаровзрывоопасности определяют экспериментально при атмосферном давлении и комнатной температуре. Эти значения приводят в справочниках.

Одним из основных параметров, который может существенно влиять на значения концентрационных пределов является температура. Характер влияния температуры на изменение границ самовоспламенения показан на рис. 49.



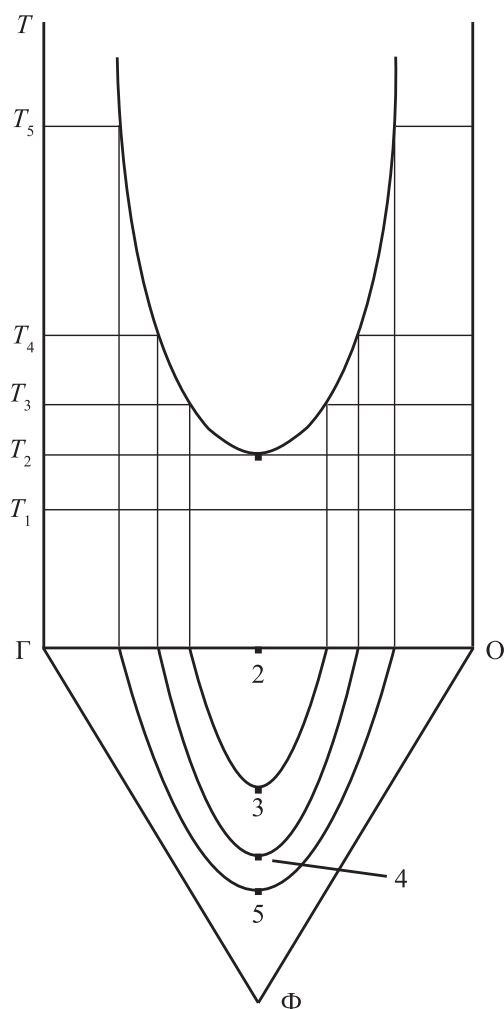


Рис. 49. Влияние температуры на изменение концентрационных границ области самовоспламенения

Как видно из рис. 49, при низкой температуре  $T_1$  область взрываемости не достигается.

При температуре  $T_2$  существует только одно значение соотношения концентраций между горючим и окислителем (точка 2), при котором достигается граница области взрываемости.

С увеличением температуры до значения  $T_3$  возникают НКПВ и ВКПВ для соотношения между горючим и окислителем, которые начинают приближаться друг к другу и в конечном счете совпадать при увеличении содержания в реакционной системе количества флегматизатора (линия 3).

Дальнейшее увеличение температуры до значений  $T_4$  и  $T_5$  приводит к увеличению диапазонов концентраций между НКПВ и ВКПВ и расширению границ областей взрываемости в присутствии флегматизатора (соответственно линии 4 и 5).

Кроме того, из рис. 49 следует, что с увеличением температуры значения концентрационных пределов все меньше отличаются друг от друга и асимптотически стремятся к постоянным значениям

Таким образом, в зависимости от того, при какой температуре осуществляется технологический процесс, концентрационная область взрываемости может не достигаться или достигаться при определенных соотношениях концентраций горючего, окислителя и флегматизатора. Соответственно, это относится и к областям взрываемости и детонации.

На рис. 50 показана зависимость установленного НКПВ от реализуемой температуры технологического процесса.

Пусть технологический процесс осуществляют при температуре  $T_1$ . Для этой температуры критическое значение концентрации горючего компонента соответствует точке 2. При установлении безопасного значения НКПВ (переход из точки 0 к точке 1) значение концентрации горючего компонента снизится до величины, соответствующей точке 3.

Однако данное значение концентрации горючего компонента будет безопасным только до температуры  $T_2$ . Превышение этого значения при осуществлении технологического процесса (например, при нарушениях нормальной эксплуатации) приведет в случае достижения точки 4 на рассматриваемой диаграмме к самовоспламенению технологической среды.

Отсюда следует, что при применении значений концентрационных пределов, полученных стандартными методами, следует учитывать степень отклонения значений параметров технологического процесса от стандартных условий.

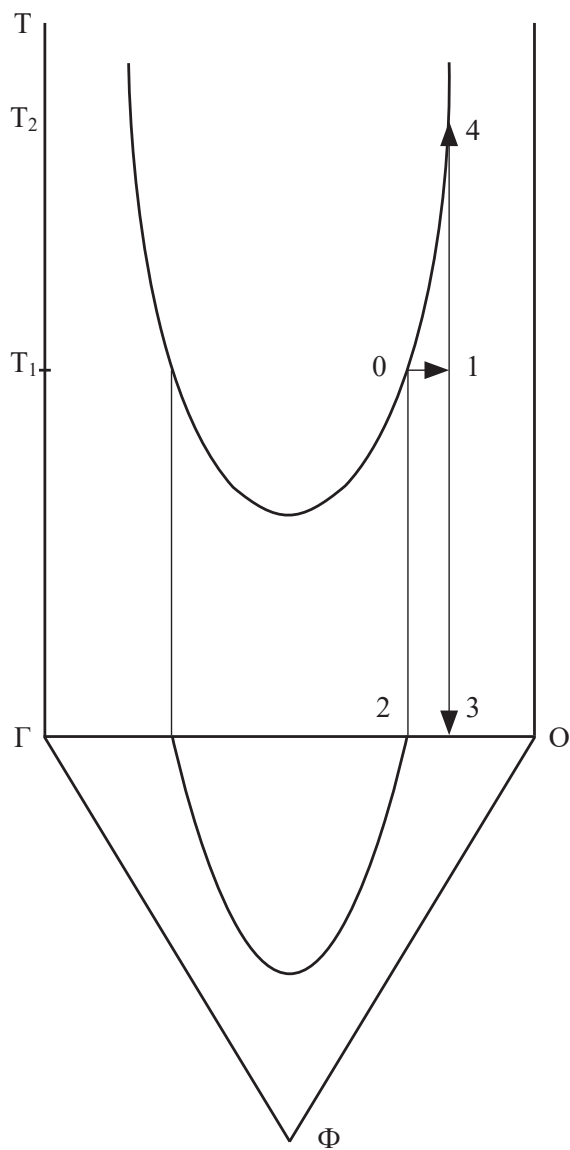


Рис. 50. Условия соответствия значения концентрационного предела безопасным значениям

#### **6.4. Температурные пределы**

В еще большей степени, чем концентрации реагентов, на скорость химической реакции оказывает температура: в соответствии с уравнением Аррениуса скорость реакции увеличивается с ростом температуры по экспоненциальной зависимости. Поэтому в теории теплового взрыва температура является основным фактором, определяющим условия перехода химической реакции в режимы горения и взрыва.

К стандартным показателям пожаровзрывоопасности веществ и материалов, характеризующих пожарную опасность и пожаровзрывоопасность технологических сред, согласно [1, 32], относятся:

- температура самонагрева;
- температура вспышки;
- температура воспламенения;
- температура самовоспламенения;
- температурные пределы распространения пламени.

Определения этих показателей пожаровзрывоопасности, данные в [32], приведены в табл. № 17.

В отношении определения температуры самонагрева можно заключить, что:

– данный показатель пожаровзрывоопасности может относиться к любому веществу, способному самонагреться за счет протекания химических реакций с его участием;

– выше температуры самонагрева данного вещества самопроизвольный процесс его нагрева может привести к тлению или воспламенению, следовательно, в этом случае вещество способно стать пожароопасным;

– соответственно, температура самонагрева – самопроизвольный процесс его нагрева не приведет к его тлению или пламенному горению, и в этих условиях данное вещество не будет представлять пожарную опасность.

Таблица № 17

**Температурные показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов**

№ п/п	Определение
1	<b>Температура вспышки</b> – наименьшая температура конденсированного вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары, способные вспыхивать в воздухе от источника зажигания; устойчивое горение при этом не возникает <b>Вспышка</b> – быстрое сгорание газо- и паровоздушной смеси над поверхностью горючего вещества, сопровождающееся кратковременным видимым свечением
2	<b>Температура воспламенения</b> – наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что при воздействии на них источника зажигания наблюдается воспламенение
3	<b>Температура самовоспламенения</b> – наименьшая температура окружающей среды, при которой в условиях специальных испытаний наблюдается самовоспламенение вещества
4	<b>Температурные пределы распространения пламени</b> – такие температуры вещества, при которых его насыщенный пар образуют в окислительной среде концентрации, равные соответственно нижнему (нижний температурный предел) и верхнему (верхний температурный предел) концентрационным пределам распространения пламени
5	<b>Температурой самонагрева</b> называется самая низкая температура вещества, при которой самопроизвольный процесс его нагревания не приводит к тлению или пламенному горению [33]

Согласно определению температуры вспышки данный показатель пожаровзрывоопасности означает, что:

– данный показатель относится к конденсированным (преимущественно жидким) горючим веществам, над поверхностью которых в достаточном количестве образуются горючие пары и горючие газы (например, в результате термического разложения вещества);

– вспышка горючих паров или газов горючих веществ происходит не самопроизвольно, а в результате воздействия источника зажигания, при отсутствии которого вспышка не происходит;

– источник зажигания должен выделять достаточную энергию для обеспечения вспышки паров и газов горючих веществ; при малой энергии (мощности) источника зажигания вспышки не произойдет;

– скорость образования паров и газов над поверхностью горючих веществ должна быть достаточной, чтобы привести их к вспышке данным источником зажигания, но не достаточной для их последующего устойчивого горения, то есть количество горючих паров и газов, на которые воздействует источник зажигания – должно быть не достаточным для распространения пламени;

– значение этого показателя пожаровзрывоопасности для конкретного горючего вещества относится только к специальным условиям его определения (состав окислительной среды, размер реакционного сосуда, давление среды, энергия источника зажигания и др.);

– ниже этой температуры пары или газы данного горючего вещества не способны вспыхивать от источника зажигания в условиях, при которых было определено значение температуры вспышки, что не исключает возможности вспышки таких паров и газов в других условиях;

– медленное сгорание горючей смеси паров или газов над поверхностью вещества не относится к вспышке;

– быстрое сгорание горючей смеси паров или газов над поверхностью горючего вещества в окислительной среде, сопровождающееся образованием сжатых газов, не относится к вспышке.

При рассмотрении определения температуры воспламенения по аналогии с предыдущим показателем пожаровзрывоопасности можно выделить следующие положения:

– данный показатель пожаровзрывоопасности применим к веществам (жидким, твердым), способным выделять горючие пары и газы;

– для зажигания выделяющихся из вещества горючих паров и газов в окислительную среду требуется источник зажигания с достаточной энергией (мощностью); при отсутствии источника зажигания или при воздействии источника зажигания с недостаточной энергией – зажигание выделяющихся горючих паров и газов не произойдет;

– скорость выделения из вещества горючих паров или газов в окислительную среду должна быть достаточной для зажигания источником энергии и последующего устойчивого горения; при меньшей скорости выделения горючих паров или газов в окислительную среду устойчивого пламенного горения не происходит;

– значение данного показателя пожаровзрывоопасности применимо только для условий специальных испытаний, в которых определяют данное значение;

– при более низком значении этой температуры выделяющиеся из горючего вещества пары и газы при воздействии источника зажигания – не способны к взаимодействию с окислительной средой с образованием устойчивого пламенного горения в условиях специальных испытаний, в которых определено значение данной температуры; вместе с тем представляется возможным их устойчивое пламенное горение в других условиях, отличных от установленных специальных.

В определении температуры самовоспламенения можно выделить следующие положения:

– данный показатель пожаровзрывоопасности применим к любым горючим веществам, в том числе обладающим взрывоопасными свойствами;

– при этой температуре должно происходить резкое увеличение скорости экзотермических реакций по сравнению с более низкими температурами, сопровождающееся резким увеличением тепловыделения в результате протекания реакции (но не резким увеличением газовыделения);

– резкое увеличение скорости экзотермических реакций должно заканчиваться пламенным горением вещества, то есть не развивается дальше в режим взрыва;

– значение данного показателя пожаровзрывоопасности применимо только для условий проведения специальных испытаний, при которых определено это значение; для других условий температура самовоспламенения этого вещества может иметь другое значение;

– ниже температуры самовоспламенения в условиях проведения специальных испытаний, не произойдет резкое увеличение скорости экзотермических реакций и, следовательно, не произойдет пламенное горение; однако для других условий вероятность возникновения пламенного горения может сохраняться.

В соответствии с определением температурных пределов распространения пламени можно заключить, что:

– данный показатель пожаровзрывоопасности применим к конденсированным горючим веществам (жидким, твердым) над поверхностью которых находятся их насыщенные пары; соответственно, данный показатель не относится к условиям, при которых над поверхностью веществ не достигнуто насыщение их паров;

– в конкретной окислительной среде насыщенные пары над данным горючим веществом должны достигать значений концентрационных пределов распространения пламени, соответственно: нижний температурный предел – НКПВ, а верхний температурный предел – ВКПВ;

– если насыщенные пары над данным горючим веществом в конкретной окислительной среде не достигают концентрационных пределов распространения пламени, то не достигаются и температурные пределы распространения пламени;

– если насыщенные пары над данным горючим веществом в конкретной окислительной среде достигают только НКПВ, то достигается только нижний температурный предел распространения пламени;

– значения температурных пределов распространения пламени применимы только для условий определения концентрационных пределов распространения пламени, которые рассмотрены в предыдущем разделе; для других условий температурные пределы распространения пламени могут принимать другие значения.

Рассмотренные температурные показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов характеризуют эволюцию интенсивности тепловыделения при протекании химической экзотермической реакции для заданного состава реакционной системы применительно к двум случаям:

– повышению температуры реакционной системы за счет внутренних источников тепла: теплового эффекта экзотермической реакции (а для технологических сред ОЯТЦ – дополнительно за счет радиогенного тепла, выделяющегося при радиоактивном распаде радионуклидов);

– повышению температуры реакционной системы за счет внешних источников энергии, в том числе для технологических сред ОЯТЦ, за счет воздействия ИИ от других технологических сред ОЯТЦ.

В первом случае повышение интенсивности самопроизвольного нагрева пожаровзрывоопасной среды включает последовательное



протекание следующих стадий, соответствующих температурным показателям пожаровзрывоопасности:

- самонагревание;
- самовоспламенение.

При этом следует учитывать саму возможность протекания химической экзотермической реакции, начиная с определенного значения температуры, ниже которого она не может быть зафиксирована существующими методами анализа.

Во втором случае, в зависимости от увеличения энергии (мощности) внешнего источника энергии, имеет место следующая последовательность возрастания интенсивности тепловыделения в пожаровзрывоопасной среде в результате инициирования химической экзотермической реакции:

- вспышка;
- воспламенение.

Варьирование составом пожаровзрывоопасной среды в направлении от состава, соответствующего наиболее пожаровзрывоопасной смеси (обычно стехиометрического состава), приведет при прочих равных условиях к соответствующему изменению режимов тепловыделения:

- переходу от самовоспламенения к самонагреванию;
- переходу от воспламенения к вспышке.

Соответственно для составов пожаровзрывоопасной среды, более удаленных от стехиометрического состава, будут достигнуты более высокие значения температурных показателей пожаровзрывоопасности.

Это обстоятельство учитывается при установлении температурных пределов распространения пламени в зависимости от достижения концентрационных пределов распространения пламени над поверхностью конденсированных горючих веществ.

Соответствие между температурными и концентрационными пределами распространения пламени для конденсированных горючих веществ в общем виде показано на рис. 51.

Как следует из рис. 51, значения температурных пределов распространения пламени, соответствующие концентрационным пределам, находятся на кривой зависимости температуры паров горючих веществ от их состава в смеси с окислительной средой.

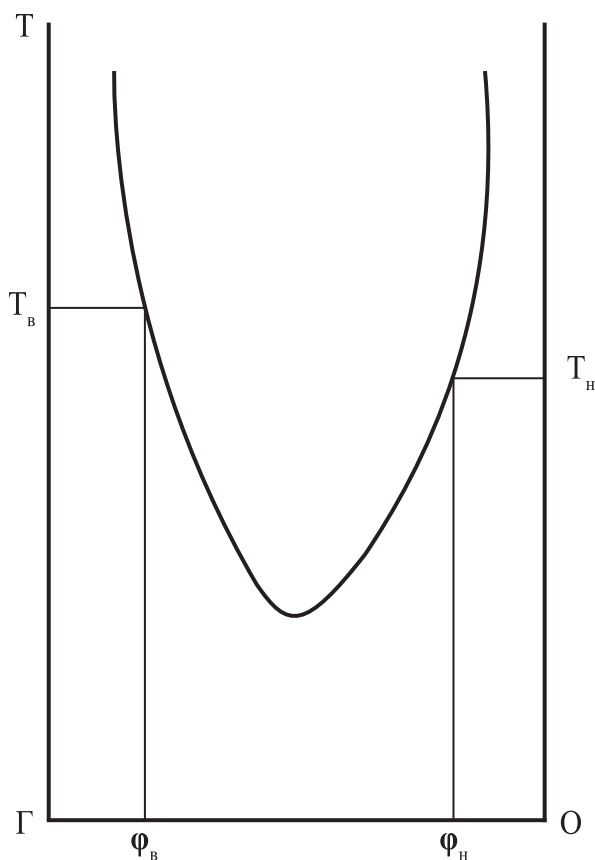


Рис. 51. Взаимосвязь между температурными и концентрационными пределами распространения пламени

Характер зависимости температуры самовоспламенения газовой пожаровзрывоопасной смеси от давления показан ранее на рис. 46.

При этом следует учитывать, что давление газовой системы равно сумме парциальных давлений ее компонентов, которые пропорциональны их объемным концентрациям.

В работе [69] на диаграмме с координатами давление – температура для самовоспламенения водородсодержащей смеси в области высоких

давлений приведены границы изменения механизма лимитирующих химических реакций, образующие разделительную зону, иногда называемую «четвертым пределом воспламенения».

С учетом этого на рис. 52 представлен обобщенный вид зависимости температуры самовоспламенения пожаровзрывоопасной газовой смеси от давления в реакционной системе.

Соответственно аналогичный вид зависимости может относиться и к границам областей взрываемости и детонации.

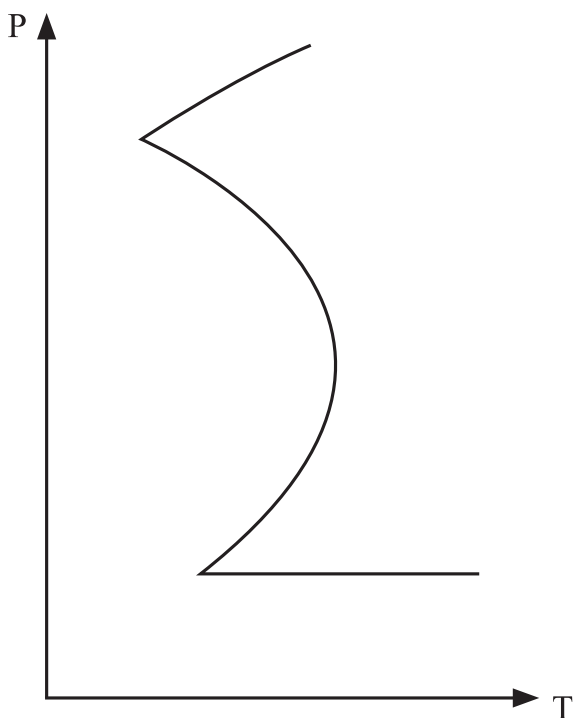


Рис. 52. Обобщенный вид диаграммы пределов самовоспламенения пожаровзрывоопасной газовой среды

При определении температурных пределов самовоспламенения и взрываемости пожаровзрывоопасных технологических сред необходимо учитывать их особенности.

Например, применительно к обеспечению ПВБ технологических сред, содержащих водород, который образуется на ОЯТЦ в результате радиолиза воды и органических соединений, следует учитывать следующие факторы, влияющие на значения температурных пределов, которые изложены в [121]:

– в адиабатических условиях сгорание водородно-воздушной смеси, содержащей 4,1 % водорода, что соответствует НКПВ при нижнем зажигании, происходит при температуре примерно равной 350 °С, что значительно ниже температуры теплового самовоспламенения такой смеси в закрытом сосуде при атмосферном давлении;

– при температуре 540 °С и давлении ниже второго предела взрываемости (20–100 мм рт. ст.) пересечение струй водорода и кислорода в атмосфере азота может происходить без воспламенения; если же в место пересечения струй ввести кварцевую палочку – произойдет воспламенение; алюминиевый пруток воспламенение не вызывает; струи водорода и кислорода, пересекающиеся аналогичным образом при 560 °С и атмосферном давлении, воспламеняются при отсутствии добавок;

– смесь водорода и кислорода, помещенная в кварцевый сосуд и находящаяся при температуре 420 °С, которая ниже температуры, соответствующей пересечению первого и второго пределов взрываемости – самопроизвольно не взрывается; если взорвать такую смесь с помощью искры и затем, эвакуировав сосуд, вновь наполнить его той же смесью, то через промежуток времени, измеряемый секундами или минутами, без помощи искры произойдет взрыв; результаты таких опытов трудно воспроизводимы и находятся в сильной зависимости от состояния сосуда; причиной возникновения взрыва является содержание атомов и радикалов, образующихся при разветвлении цепей в первоначальном взрыве и концентрирующихся на поверхности сосуда; предположение о том, что атомы и радикалы изменяют природу поверхности, подтверждается на опыте;

– в сосудах с внутренней поверхностью, обработанной различными солями (например, хлоридом калия), скорость реакции между водородом и кислородом может уменьшаться более чем в 1 000 раз; при температурах, значительно превышающих 560 °С, для неподвижной смеси заметного влияния хлорида калия не отмечалось; в опытах со струйной методикой действие хлорида калия было еще очень сильным даже при температурах вплоть до 650 °С; влияние обработки внутренней стенки сосуда хлоридом

калия гораздо более резко выражено в опытах со струйной методикой, нежели в опытах с неподвижной смесью;

– результаты опытов с неподвижной смесью водорода и кислорода в серебряном сосуде при температурах вплоть до 700 °С показали, что даже при температурах, при которых реакция в кварцевом сосуде становится очень быстрой или даже взрывной, в серебряном сосуде наблюдается только медленная каталитическая реакция на поверхности;

– с уменьшением размеров сосуда температура воспламенения должна увеличиваться; это было подтверждено экспериментально; при увеличении размеров сосуда минимум температуры воспламенения смещается в область более бедных по горючему веществу смесей: если увеличивать общее давление, то температура воспламенения понижается, и минимум ее соответствует более богатым смесям.

Приведенные температурные показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов характеризуют эволюцию интенсивности тепловыделения при протекании химической реакции для заданного состава реакционной системы: самонагревание – вспышка от источника зажигания – воспламенение от источника зажигания – самовоспламенение, а также взаимосвязь температурных критериев от состава реакционной системы.

Это относится и к распространению температурных критериев на последующие за самовоспламенением режимы дефлаграционного взрыва и детонации.

На рис. 53 показаны возможные следствия установления безопасного значения температурного предела осуществления технологического процесса.

Пусть газообразная технологическая среда участвует в технологическом процессе при давлении  $P_0$  (например, при атмосферном давлении). Критическое значение температуры при этом, согласно диаграмме «трех пределов», равна  $T_0$ .

При установлении безопасного значения температурного предела (переход из точки 0 к точке 1) максимально допустимую температуру технологического процесса снизили до температуры  $T_1$ .

Если значения  $T_0$  и  $T_1$  близки, то при нарушениях нормальной эксплуатации становятся возможным увеличение температуры (до точки 0) или давления (до точки 2), или одновременно температуры и давления в случае протекания химической реакции, сопровождающейся

газовыделением, до критических значений и возникновение самовоспламенения (взрыва) технологической среды.

Кроме того, при изменении концентрации реагентов или при увеличении масштаба процесса границы трех пределов (кривая «а») могут сместиться в сторону более низких значений температуры и давления (кривая «в») и безопасное значение температурного предела может попасть в область самовоспламенения.

Таким образом, в этом случае необходимо устанавливать безопасные значения температуры и давления с учетом возможного изменения границ области самовоспламенения внутри безопасной области (например, устанавливая безопасные значения  $T_1$  и  $P_1$ ).

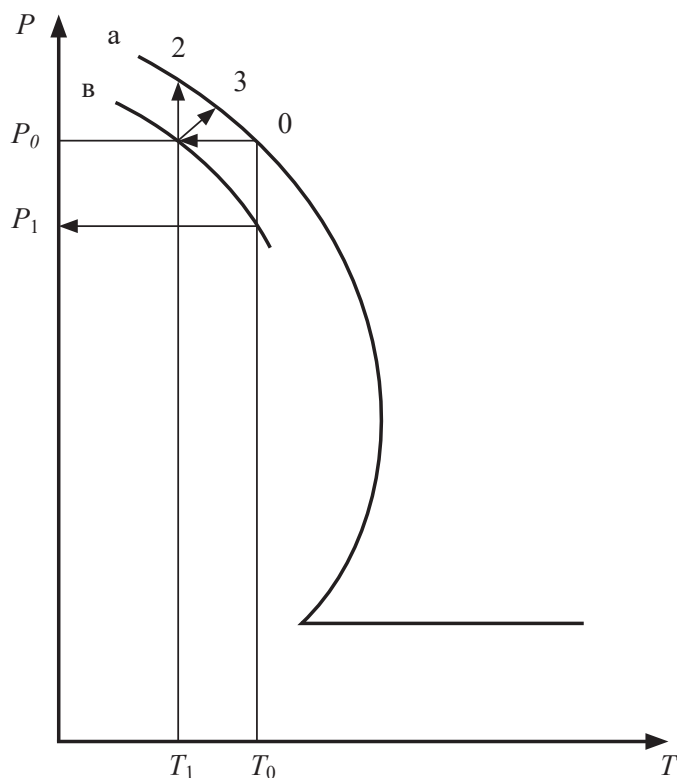


Рис. 53. Условия соответствия значения температурного предела безопасным значениям

## **6.5. Пределы по геометрическим размерам**

Условия самовоспламенения пожаровзрывоопасных сред, в соответствии с теорией теплового взрыва, определяются соотношением между скоростью тепловыделения в ходе протекания химической экзотермической реакции и скоростью отвода тепла, выделяющегося в реакционной системе, в окружающую среду.

Тепловой поток от реакционной системы в окружающую среду пропорционален площади поверхности теплоотвода, относящейся к данному объему тепловыделяющей среды, то есть пропорционален ее удельной поверхности.

Кроме того, для гетерогенных процессов скорость протекания самой химической экзотермической реакции и, следовательно, соответствующая ей скорость тепловыделения – пропорциональны удельной поверхности твердых или жидких компонентов реакционной системы.

Таким образом, к критическим значениям параметров, определяющих переход химической экзотермической реакции в режим самовоспламенения (взрыва) следует отнести:

- геометрические размеры технологического оборудования, в котором находится пожаровзрывоопасная технологическая среда;
- геометрические размеры частиц твердых или жидких пожаровзрывоопасных веществ, реагирующих с окислительной средой, а также удельную поверхность (размеры пор) пористых пожаровзрывоопасных материалов.

В качестве показателя удельной поверхности всего объема технологической среды обычно рассматривают диаметр или радиус сосуда (аппарата, реактора), в котором она находится, а в качестве показателя удельной поверхности конденсированных компонентов гетерогенной технологической среды – диаметр или радиус их частиц.

При рассмотрении влияния диаметра технологического оборудования, который относится к масштабному фактору осуществления технологического процесса, на условия самовоспламенения пожаровзрывоопасной технологической среды необходимо принимать во внимание следующие сведения.

В [121] сообщается, что:

- чем больше размеры реакционного сосуда, тем меньше относительное количество тепла, отдаваемого при данной температуре

реакционной смесью в единицу времени; поэтому чем больше сосуд, тем ниже должно быть давление воспламенения;

– скорость реакции в стехиометрической смеси водорода и кислорода, находящейся в кварцевом сосуде при 560 °С пропорциональна квадрату диаметра сосуда;

– для изменения скорости реакции между водородом и кислородом в присутствии следов диоксида азота от быстрой до взрывной оказалось достаточным небольшое изменение реакционного сосуда, а именно удаление центральной трубки для впуска газа;

– реакция между оксидом углерода и кислородом, катализируемая парами воды, резко отличается от реакции, идущей в сухой смеси; скорость реакции не только сильно увеличивается, но и начинает зависеть от размеров сосуда, возрастая с их увеличением пропорционально квадрату диаметра сосуда;

– с уменьшением размеров сосуда температура воспламенения для реакции между углеводородами и кислородом должна увеличиваться; уменьшение диаметра сосуда сужает область воспламенения; это явление может быть усилено заполнением сосуда (стеклянной набивкой) настолько, что реакция как взрывная, так и не взрывная, полностью подавляется;

– исследуя зажигание метановоздушных смесей, установили, что в тех случаях, когда искра не способна вызвать воспламенение, она тем не менее вызывает реакцию в не очень большом, но вполне определенном объеме газа, величина которого порядка кубического миллиметра;

– при увеличении диаметра сосуда до примерно 5 см обычно расширяются концентрационные пределы распространения пламени: НКПВ в широких трубках соответствует более бедным (по горючему компоненту) смесям, чем в узких трубках, а ВКПВ – более богатым смесям; дальнейшее увеличение диаметра сосуда редко приводит к смещению концентрационных пределов, превышающему десятые доли процента.

В [29] приведено следующее уточнение:

– обратная пропорциональность скорости гибели радикалов на стенках квадрату радиуса имеет место только при интенсивной гибели на стенке; вероятность гибели может меняться от 0 до 1;

– при переходе к малым значениям вероятности гибели радикалов вместо квадрата радиуса в формуле появляется первая степень радиуса; это следствие подтверждается и строгой теорией; такое явление принято называть переходом из «диффузионной» в «кинетическую» область.



В [69] отмечены следующие обстоятельства:

– критический диаметр трубки – один из параметров, характеризующих потухание пламени; используется также понятие критического зазора, то есть расстояния между двумя параллельными пластинами, при котором также достигается гашение пламени; эмпирически установлено, что критический диаметр трубки примерно в 1,5 раза больше, чем критический зазор;

– принято считать, что критический диаметр трубки приблизительно обратно пропорционален давлению;

– величина критического расстояния (диаметра, зазора) и минимальная энергия зажигания связаны взаимно однозначным соответствием.

Характер изменения степени влияния масштаба технологического процесса на границы области самовоспламенения (взрыва) можно представить при рассмотрении рис. 46. Применительно к этому случаю кривые 1, 2, 3 на рис. 46 соответствуют направлению изменения области самовоспламенения (взрыва) при постепенном уменьшении масштаба технологического процесса (количества технологической среды или диаметра сосуда, в котором находится технологическая среда).

Данный характер эволюции области самовоспламенения (взрываемости) при изменении масштаба пожаровзрывоопасной системы описан в работе [122].

Как следует из рис. 46:

– увеличение диаметра технологического оборудования (и соответствующего ему масштаба технологического процесса) приводит к сдвигу области самовоспламенения в сторону меньших значений температуры и давления и, следовательно, к ее расширению и повышению пожаровзрывоопасности применяемой в процессе технологической среды;

– увеличение диаметра технологического оборудования приводит к снижению температуры и давления, соответствующих переходам первого предела самовоспламенения во второй и второго предела самовоспламенения в третий, что способствует условиям возникновения теплового взрыва;

– уменьшение диаметра сосуда приводит к сужению области самовоспламенения технологической среды и при достижении минимального критического диаметра сосуда – к исключению возможности

ее самовоспламенения для данного состава реакционной системы и содержания примесей.

Кроме того, увеличение масштаба технологического процесса приводит к расширению области концентраций компонентов технологической среды, к снижению НКПВ (и, соответственно, к повышению ВКПВ), к увеличению минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора и к снижению температуры ее самовоспламенения (взрыва).

Соответственно этому, для предотвращения взрыва (детонации) критический минимальный диаметр сосуда будет меньше, чем критический минимальный диаметр сосуда для самовоспламенения пожаровзрывоопасной смеси.

Ниже приведены краткие сведения о влиянии диаметра сосуда на предотвращение детонации находящейся в нем взрывоопасной технологической среды.

Согласно [69] в интервале изменения диаметра трубы, в которой находится смесь водорода с воздухом, от 80 до 520 мм с достаточной условностью можно считать, что:

- концентрационные пределы для медленных пламен не изменяются (4 и 75 % водорода) во всем указанном диапазоне изменения диаметра трубы;

- для быстрых пламен НКПВ снижается, а верхний – увеличивается при увеличении диаметра трубы до 174 мм, а далее при увеличении диаметра трубы до 520 мм сохраняют постоянные значения;

- применительно к переходу горения в детонацию в диапазоне изменения диаметра трубы 80–174 мм происходит более резкое изменение концентрационных пределов, а в следующем диапазоне 174–520 мм – более плавное: соответственно, уменьшение НКПВ и увеличение ВКПВ.

Согласно [82] *«было установлено, что детонационная волна, распространяющаяся в достаточно узком канале, разрушается уже в таких условиях, в которых возможна устойчивая дефлаграция. Ее разрушение обусловлено потерями тепла в стенки от фронта детонационной волны. При наличии потерь ударное сжатие детонирующей среды ослабевает, температура во фронте волны понижается, прекращается самовоспламенение сжатого газа, детонационная волна разрушается. Это происходит при сгорании в трубах уже такого диаметра, для которого потери от*

дефлаграционного пламени еще не достигают критического значения. Такое различие обусловлено большой шириной зоны реакции и интенсивностью процессов переноса в детонационной волне.

Значительное возрастание давления и скорости горения в детонационной волне никак не сказывается на процессе гашения. Причина заключается в том, что процесс начинается с разрушения детонационной волны, гашение пламени происходит в среде, состояние которой совпадает с исходным.

Для задач техники взрывобезопасности наиболее существенен вопрос о давлении в детонационной волне. Как показали опыты, это давление можно снизить в несколько раз уже в том случае, если детонационная волна проходит через каналы, диаметр которых значительно превосходит критический для ее гашения. Аналогичный эффект наблюдается и при распространении быстрого сильно турбулизованного дефлаграционного пламени. Для предотвращения разрушения аппаратуры, для которой невозможно гарантированно исключить распространение в ней пламени, эффективны насадки из крупных гранул, заполняющие защищаемый аппарат. Такое приспособление во много раз снижает рост давления при сгорании».

Что касается влияния размера частиц на условия их самовоспламенения, то применительно к ОЯТЦ это в первую очередь относится к пирофорным материалам, применяемым или образуемым в технологических процессах и способным самовоспламеняться в контакте с воздухом при комнатной температуре [122].

Особенности влияния размера частиц на детонацию в гетерогенных системах приведена в [10]:

– гетерогенными являются все многофазные системы, а также однофазные дисперсные (разделенные на микрочастицы – «зерна») или имеющие любые разрывы сплошности в виде пор, полостей, каналов;

– для гетерогенных взрывчатых смесей типичные размеры частиц составляют  $10^{-6} - 10^{-3}$  м;

– в системе капли углеводородного горючего – газообразный кислород детонация существует в широком интервале размера капель (от микрометров до миллиметров) и концентраций, в том числе для малолетучих топлив, таких как керосин;

– для аэрозолей с каплями диаметром менее 10 мкм НКПВ мало отличается от предела в газовых смесях;

– смесь капель гептана с воздухом детонировала лишь при размере капель 5–10 мкм, когда, несомненно, присутствовала высокая концентрация паровой фазы горючего; для смесей воздуха с каплями мало летучих углеводородов детонация в трубах (как и в свободном объеме) не наблюдалась;

– в мелкодисперсных аэрозолях жидкого горючего (с размером капель менее 10 мкм) в трубах диаметром 5–22 мм имеет место аналогичный газовым смесям переход горения в детонацию на длине 20–100 диаметров трубы;

– в системе с каплями диаметром более 200 мкм экспериментальная скорость детонации на 4–40 % ниже скорости газовой детонации для той же концентрации горючего.

В общем виде тип зависимости температуры самовоспламенения дисперсных материалов от размера их частиц показан на рис. 54 (кривая «а») применительно к фиксированным значениям других технологических параметров, определяющих условия самовоспламенения.

Данный тип зависимости температуры самовоспламенения пиррофорных материалов от диаметра их частиц определен в [72].

Как следует из рис. 54, температура самовоспламенения экспоненциально снижается с уменьшением размера частиц дисперсного материала, при этом область самовоспламенения находится выше приведенной кривой.

Для пиррофорных материалов при комнатной температуре  $T_0$  самовоспламеняться будут частицы с размером менее, чем  $d_0$ . При более высокой температуре  $d_1$  размер самовоспламеняющихся частиц возрастет до  $d_2$ .

Если в технологическом процессе участвуют частицы с максимальным размером  $d_2$ , то необходимо снизить температуру технологического процесса с  $T_1$  (точка 1) до безопасного значения  $T_3$  (точка 3) или использовать при температуре  $T_1$  частицы с размером не менее  $d_2$  (точка 2).

Однако при этом необходимо учитывать возможность смещения границ области самовоспламенения в сторону больших размеров частиц при изменении концентрации аэрозолей в газовой среде, при увеличении давления или масштаба технологического процесса (кривая «в») и попадания выбранных безопасных значений параметров в область самовоспламенения (взрыва).

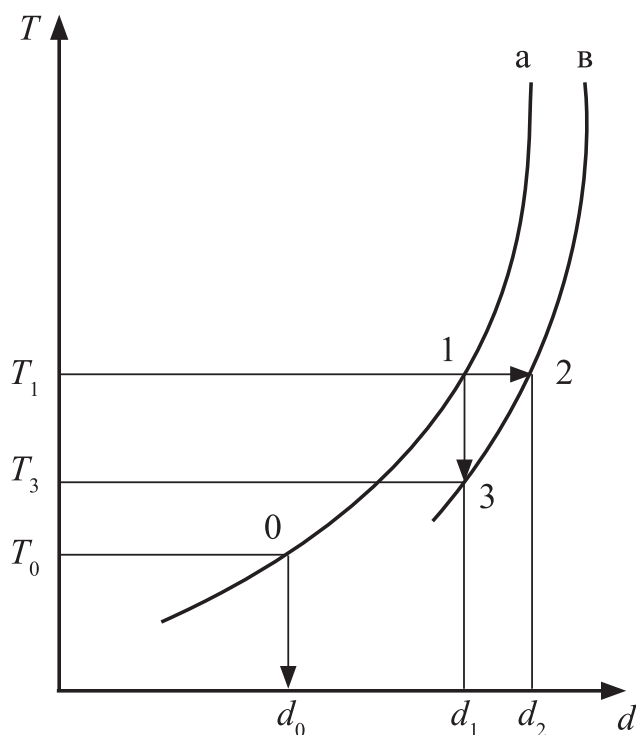


Рис. 54. Зависимость температуры самовоспламенения дисперсного материала от размера его частиц

## 6.6. Энергетические пределы

Под энергетическим пределом воспламенения (взрыва, детонации) понимают наименьшее (критическое) значение энергии, поступающей локально в пожаровзрывоопасную среду, с фиксированными значениями технологических параметров за короткий промежуток времени от данного источника энергии, превышение которого приводит к ее воспламенению (или непосредственно к взрыву или детонации).

В соответствии с приведенным понятием энергетический предел для данной пожаровзрывоопасной среды:

– изменяется при изменении исходных (перед воздействием источника энергии) значений ее технологических параметров;

- зависит от типа энергетического воздействия;
- зависит от местоположения локального ввода энергии в ее объем;
- зависит от интервала времени ввода энергии (то есть от вводимой мощности).

В стандарте [32] приведено следующее определение: минимальная энергия зажигания – наименьшее значение энергии электрического разряда, способной воспламенить наиболее легковоспламеняющуюся смесь газа, пара или пыли с воздухом.

Вводимая в пожаровзрывоопасную смесь дополнительная энергия от источника зажигания (или источника инициирования взрыва) затрачивается на локальное (в определенной части объема) изменение ее состояния от исходного до значений параметров, соответствующих области самовоспламенения (взрыва, детонации), с последующим распространением горения (возникновения взрыва, детонации) по ее объему.

В связи с этим энергетический предел для данной пожаровзрывоопасной смеси:

- снижается по мере приближения исходных значений технологических параметров к их значениям, соответствующим границам области ее самовоспламенения (взрыва, детонации);

- принимает минимальное значение при варьировании величины технологического параметра (относительно к показателям пожаровзрывоопасности), если на зависимости между этим и другим параметром, характеризующей область самовоспламенения (взрыва, детонации), имеется минимум;

- при последовательной смене режимов горения и взрыва – имеет большее значение для инициирования ее детонации и, соответственно, меньшее значение для инициирования ее горения.

Энергию (мощность) потенциального источника зажигания (инициирования взрыва, детонации) можно считать безопасной для данной пожаровзрывоопасной смеси, если ее значение не превышает установленный энергетический предел.

В [26] зависимость между энергией зажигания и концентрационными пределами описывается следующим образом:

- с увеличением мощности источника зажигания область воспламенения расширяется. Это означает, что НКПВ уменьшается, а ВКПВ возрастает;

– однако расширение пределов не безгранично. При определенной мощности источника (насыщенной) дальнейшего изменения концентрационного предела воспламенения не происходит;

– при снижении мощности источника область воспламенения сужается и при некотором критическом значении происходит выравнивание НКПВ и ВКПВ. Это означает, что при дальнейшем снижении мощности смесь не воспламенится при любом соотношении горючего и окислителя;

– изменение давления в горючей смеси меняет область воспламенения и критическую энергию зажигания. Снижение давления в горючей смеси равнозначно снижению концентраций горючего и окислителя. Вероятность соударений молекул снижается, скорость тепловыделения достигает критического значения, и самопроизвольного развития химической реакции при действии источника зажигания не происходит. Снижение давления приводит к увеличению критической энергии зажигания, сужению области воспламенения, и при достижении определенного давления зажигания вообще не происходит;

– значительное влияние на параметры зажигания оказывают негорючие газы (флегматизаторы). При введении их в горючую смесь сужается область зажигания. Влияние флегматизаторов в значительной степени зависит от их природы (теплопроводности, теплоемкости).

Характер влияния энергии источника зажигания на условия воспламенения пожаровзрывоопасной технологической среды показан на примере достижения концентрационных пределов самовоспламенения при разных значениях температуры технологического процесса на рис. 55.

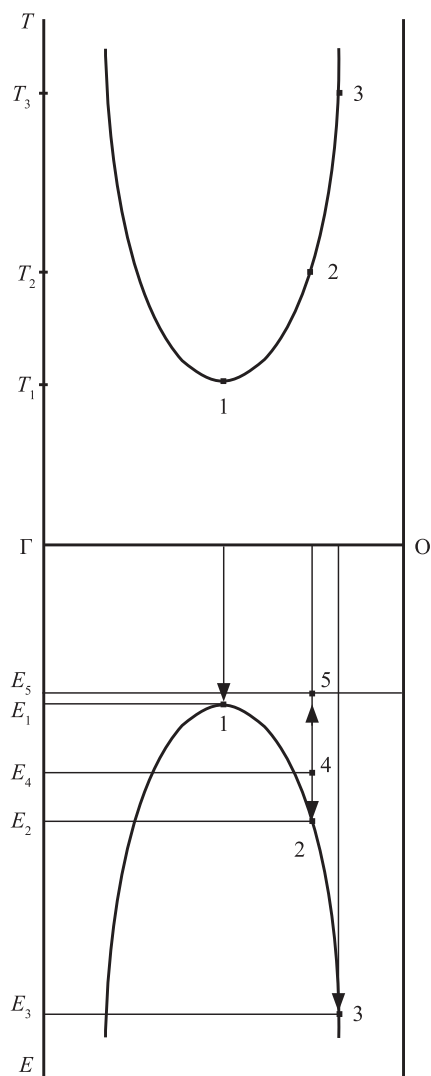


Рис. 55. Взаимосвязь между концентрационными пределами и энергией источника зажигания

На верхнем графике рис. 55 показана зависимость температуры самовоспламенения от состава смеси горючего с окислителем, а на нижнем графике соответствующая ей зависимость энергии зажигания от состава этой смеси при фиксированной исходной температуре смеси.



Приведенный тип зависимости энергии источника зажигания от содержания горючего в смеси с окислителем соответствует зависимостям, определенным для воспламенения смеси метана с воздухом при атмосферном давлении и температуре 26 °С [123] и для воспламенения ряда углеводородно-воздушных смесей при давлении 230 мм рт. ст. [8].

В [69] отмечено, что резкое увеличение энергии зажигания при приближении к пределу характерно, по-видимому, для всякой смеси.

Минимуму зависимости температуры самовоспламенения смеси от соотношения между горючим и окислителем соответствует минимальное значение энергии источника зажигания  $E_1$  (точка 1 на рис. 55).

Для меньших значений концентрации горючего компонента в смеси с окислителем (точки 2 и 3 на рис. 55) требуются все большие величины энергии источника зажигания: соответственно  $E_2$  и  $E_3$  для исходной температуры реакционной смеси.

Применительно к составу смеси, соответствующему фигуративной точке 2 на рис. 55, относительно безопасным значением энергии источника зажигания можно считать  $E_4$ . Тем не менее следует учитывать, что в случае нарушения нормальной эксплуатации, приводящей к увеличению содержания горючего вещества в технологической среде, величина энергии источника зажигания, равная  $E_4$ , может оказаться достаточной для ее воспламенения.

Как следует из рис. 55, энергию источника зажигания можно считать безопасной ( $E_5$ ), если она не превышает минимально возможное для воспламенения значение  $E_1$ .

В качестве примера здесь уместно привести значения минимальной энергии зажигания на воздухе, полученные стандартным методом и приведенные в справочнике в качестве примера, здесь уместно привести значения минимальной энергии зажигания на воздухе, полученные стандартным методом и приведенные в справочнике [81] для некоторых веществ, представляющих интерес при обеспечении ПВБ ОЯТЦ:

- для водорода – 0,017 мДж;
- для аммиака – 680 мДж;
- для циркония с размером частиц менее 74 мкм – 5 мДж.

Обращает на себя внимание аномально низкое значение минимальной энергии зажигания, установленной для водорода.

Значения энергетических пределов воспламенения для данной пожаровзрывоопасной среды зависят как от вида энергетического

воздействия на нее источника зажигания, так и от способа ввода в нее энергии, достаточной для воспламенения.

Что касается способа зажигания пожаровзрывоопасной среды при помещении ее в вертикальный сосуд, различают зажигания снизу и сверху, при которых создаются разные условия для воспламенения и, следовательно, для которых получают различные значения энергетических пределов.

Приведенные в [121] особенности нижнего и верхнего зажиганий газообразных систем рассмотрена ранее в разделе, посвященном концентрационным пределам. При этом было установлено, что более благоприятные условия для воспламенения пожаровзрывоопасной среды создаются при ее нижнем зажигании.

Источниками зажигания пожаровзрывоопасной среды могут служить:

- электрические разряды, статическое электричество;
- фрикционные искры;
- проводники с электрическим током и нагретые проволочки;
- ИИ;
- лазерное излучение и др.

Так, для контролируемого воспламенения взрывоопасных газовых смесей при определении концентрационных пределов распространения пламени стандартным способом используют электрический разряд, возникающий между двумя электродами, находящимися под напряжением [32].

В [82] систематизированы следующие сведения об энергетических пределах инициирования горения и способах предотвращения энергетического воздействия источников зажигания горючей среды:

– при пропускании электрического разряда через газ последний ионизируется, превращаясь в плазму. Это превращение сопровождается сильнейшим разогревом, значительно большим, чем при горении. Тем не менее не всякий электрический разряд порождает в заведомо взрывчатой среде стационарное пламя. Опыт показывает, что очаг горения образуется только в том случае, если энергия разряда не меньше некоторого минимального значения. В противном случае пламя не образуется, несмотря на сильное нагревание, возникающий очаг горения оказывается неустойчивым и затухает;

– в горючей среде нагревание разрядом вызывает дополнительное тепловыделение при химической реакции, эта энергия добавляется к энергии начального импульса. По мере расширения сферы нагрева суммарное количество тепла и доля в нем энергии химического превращения все более возрастает, дальнейшее понижение температуры замедляется;

– если начальный импульс был достаточно мощным для соответствующего нагревания минимально необходимого количества горючей среды, структура зоны изменения температуры с ростом времени стремится к определенной предельной, устанавливается стационарный режим. Отводящееся в несгоревшую среду и излучаемое тепло полностью компенсируется выделяющимся при реакции, температура не понижается ниже температуры горения, возникает устойчивый фронт дефлаграции. К этому времени все выделившееся при реакции тепло может существенно превысить энергию разряда. При дальнейшем распространении пламени начальный импульс оказывается малым, все более затухающим возмущением стационарного горения;

– пламя возникает в том случае, если энергия разряда достаточна для соответствующего нагревания определенного количества горючей среды. Для этого необходимо создать элемент пламени, способного в дальнейшем к самопроизвольному распространению. Если величина энергии разряда слишком мала, стационарный режим не устанавливается. Теплоотвод превышает тепловыделение, горючая среда прогрессивно охлаждается, и начавшаяся реакция, локализованная в пределах зоны искрового разряда, прекращается;

– величина минимальной энергии разряда для различных горючих систем может изменяться в очень широком диапазоне: от тысячных миллиджоуля у быстрогорящих газовых сред до сотен джоулей у наиболее медленногорящих, то есть на 89 порядков;

– при многократном размыкании контактов возникают разности потенциалов во много тысяч вольт. Такие поля могут становиться причиной искрового разряда, энергия которого оказывается достаточной для поджигания воздушных смесей большинства горючих газов и паров.

Особенности зажигания искрой газовых сред с помощью индукционной катушки при стандартных условиях по температуре приведены также в [121]:

– при прохождении искры через горючую смесь воспламенение возможно только при давлениях выше некоторого критического, так как с повышением давления растет число активизирующихся молекул, а скорость рассеяния энергии, сообщаемой газу, падает;

– понижение частоты индукционной катушки, создающей искры, заметно понижает давление воспламенения, хотя как полная энергия, сообщаемая газу, так и максимальная скорость передачи энергии существенно уменьшаются;

– при одинаковой полной энергии разряда воспламенение метано-кислородной смеси осуществляется с тем большей легкостью, чем выше максимум скорости передачи энергии газу, тогда как поджигание смесей водорода или окиси углерода облегчается при увеличении продолжительности разряда за счет понижения максимальной скорости передачи энергии; во втором случае слишком высокая концентрация активных центров в искровом промежутке оказывается невыгодной для зажигания; лучшие результаты могут быть достигнуты, если в большем объеме будет создана такая концентрация, при которой возможно самоускорение реакции за счет разветвлений; поэтому выгоднее несколько растянуть разряд во времени;

– условием зажигания может служить требование непрерывного повышения температуры в центре искрового промежутка;

– зажигание определяется в основном самоускоряющейся реакцией; причиной такого ускорения является либо рост температуры, либо разветвление цепей, либо оба эти фактора вместе;

– ионизирующее действие разряда весьма существенно для зажигания;

– искра приводит к возникновению распространяющегося по всему объему пламени лишь в том случае, если выполнены некоторые критические условия; зажигающаяся способность определяется как источником зажигания, так и свойствами смеси; при изменении состава смеси могут быть достигнуты некоторые границы, вне которых даже самая мощная искра не способна вызвать распространение пламени;

– зажигающая энергия должна быть сообщена в пределах малого объема.

Специфика учета и предотвращения воспламенения в результате возникновения статического электричества изложена в [82]:

– разряды статического или контактного электричества представляют собой распространенный, трудно регламентируемый и потому наиболее опасный возможный импульс поджигания взрывчатых газовых систем. Статические заряды возникают на границах разнородных сред вследствие различия их электронного сродства, приводящего к перераспределению электронов. При разделении разноименно заряжающихся тел заряды сохраняются и могут накапливаться. Этому способствует трение, измельчение и быстрое движение заряжающихся тел;

– заряды статического электричества могут возникать и на диэлектриках, и на проводниках, если последние изолированы и заряды с них не стекают. Наиболее благоприятной средой для возникновения и накопления зарядов являются диэлектрические жидкости и сыпучие материалы;

– защитные мероприятия по предотвращению поджигания взрывчатых смесей зарядами статического электричества проводятся в двух направлениях: предотвращение образования зарядов и их нейтрализация;

– для уменьшения электризации вводят ограничения допустимых скоростей течения диэлектрических жидкостей в трубопроводах. Поскольку распыление благоприятствует электризации, горючие жидкости, контактирующие с воздухом, полагается разливать без разбрызгивания по трубам, доходящим до дна заполняемого резервуара;

– взрывоопасный газовый поток не должен содержать распыляемых капель и твердых частиц, которые могут образовываться также и при конденсации после сильного охлаждения вследствие дросселирования;

Еще одним специфичным источником зажигания могут служить так называемые фрикционные искры, действие которых описано в [82]:

– при истирании стальных предметов или ударах по ним образуются яркие искры, которые мы будем называть фрикционными. Они представляют собой кусочки металла размером 0,1–0,5 мм, оторванные при механическом воздействии, частично окисленные и сильно нагретые. Оптические измерения показали, что температура фрикционных искр малоуглеродистых сталей в воздухе равна 1 650 °С; это делает искры потенциальным поджигающим импульсом во взрывоопасных помещениях;

– установлено, что высокая температура фрикционных искр в основном обусловлена разогревом при окислении кислородом воздуха.

В восстановительной или инертной атмосфере частицы, образующиеся при истирании, не светятся. Способность гореть в кислороде является известной специфической особенностью железа. Многие широко распространенные металлы не образуют при истирании искр;

– фрикционные искры поджигают далеко не все взрывчатые смеси. Поджигающая способность искр ограничена и может быть количественно определена. Опыты показали, что из распространенных в технике горючих газов и паров только пять образуют воздушные смеси, безусловно поджигаемые фрикционными искрами: водород, ацетилен, этилен, окись углерода и сероуглерод;

– результаты измерений предельных концентраций при фрикционном поджигании хорошо воспроизводятся. Очевидно, что температура фрикционных искр в воздухе лишь незначительно ниже необходимой для поджигания, но и эта небольшая разница гарантирует взрывобезопасность.

В [123] приведены экспериментальные данные по каталитическому окислению водорода и аммиака, находящихся в смеси с воздухом, на платиновых проволочках, через которые пропускали электрический ток.

При увеличении силы тока, пропускаемого через платиновую проволочку, находящуюся в смесях водорода с воздухом, до 0,6 А – температура поверхности проволочки возрастала до 100–110 °С.

В этих условиях происходило воспламенение смесей водорода с воздухом с содержанием 1,3 и 2,75 об. % водорода и скачкообразный рост температуры поверхности платиновой проволочки соответственно до 350 и 620 °С с небольшим ее дальнейшим ростом за счет теплового эффекта экзотермической реакции.

При последующем снижении силы тока температура поверхности платиновой проволочки снижалась:

– в случае смеси с содержанием водорода 1,3 об. % – до 300 °С при силе тока 0,45 А за счет прекращения поддержания воспламенения и далее до исходной температуры поверхности платиновой проволочки при 0,3 А в отсутствие воспламенения водородсодержащей смеси;

– в случае смеси с содержанием водорода 2,75 об. % – имело место плавное снижение температуры до 580 °С при уменьшении силы тока вплоть до его прекращения; при этом выключение тока не приводило к затуханию экзотермической реакции окисления водорода.

Аналогичные зависимости температуры поверхности платиновой проволоки от силы пропускаемого через нее тока были проведены и для смесей аммиака с воздухом при содержании 3,1 и 5,2 об. % аммиака.

Из приведенных данных следует, что при использовании платины, через которую протекает электрический ток силой до 0,6–0,8 А, можно снизить концентрационный предел воспламенения в смеси водорода с воздухом до 1,3 об. % водорода, в смеси аммиака с воздухом до 3,1 об. % аммиака, а самовоспламенение на воздухе соответственно до 2,75 об. % водорода и 5,2 об. % аммиака.

В [123] также приведены следующие данные по определению нагрева поверхности платиновой проволоки при отключении электрического тока за счет теплового эффекта окисления водорода.

При изменении содержания водорода в смеси с воздухом в диапазоне 0,3–6 об. % водорода поверхность платиновой проволоки за счет теплового эффекта реакции окисления водорода повышается с 50 до 1 100 °С, причем имеет место практически линейная зависимость между температурой поверхности платиновой проволоки и содержанием водорода в смеси с воздухом. Например, при содержании водорода 2 об. % температура платиновой проволоки достигает 350 °С, при содержании воздуха 4 об. % – 750 °С.

В [69] приведены экспериментальные данные по измерению минимальной энергии зажигания при фокусировке лазерного зажигания, согласно которым:

– зависимость критической энергии зажигания от процентного содержания водорода в его смеси с воздухом представляет U-образную кривую с минимумом для стехиометрической смеси и подъемом при переходе к бедным или богатым смесям, которая расположена при более высоких значениях энергии, по сравнению с аналогичной кривой, определенной при зажигании смесей искрой;

– при разбавлении водородсодержащих смесей углекислым газом растет минимальная энергия зажигания и сужается ширина (диапазон концентраций водорода) области воспламенения.

Зависимость поглощенной дозы облучения на нижний температурный предел распространения пламени для 30 %-го раствора ТБФ в разбавителе РЭД-1 приведена в [29]. Согласно полученным экспериментальным данным, в области поглощенных доз 0–200 Вт·ч/л происходит достаточно резкое снижение значения нижнего температурного

предела распространения пламени на 10 °С с последующим медленным снижением значения данного параметра при дозах облучения от 200 до 1 000 Вт ч/л.

Отдельно следует рассмотреть случаи воспламенения источником зажигания применительно к движущимся пожаровзрывоопасным средам и инициирования детонации.

В работе [69] сообщается об увеличении энергии, необходимой для зажигания искрой бедных по водороду смесей с воздухом, разбавленных большим количеством углекислого газа, если смесь турбулизована, а также о том, что;

– рост энергии зажигания, по сравнению с энергией зажигания неподвижной смеси, происходит как при увеличении интенсивности турбулентности, так и при увеличении количества разбавителя.

– для смеси с содержанием 45 % углекислого газа энергия, необходимая для зажигания искрой, увеличивается на два порядка по сравнению с энергией зажигания неподвижной смеси.

Автором [10] отмечены два способа детонации взрывоопасной смеси источником зажигания и приведены следующие значения энергии, необходимой для инициирования детонации:

– непрямоe инициирование в результате «мягкого» зажигания, ускорения пламени и перехода горения в детонацию;

– прямоe инициирование внешним источником энергии (высоковольтной электрической искрой, дугой в геометрии с жесткими границами, мощным взрывом);

– значения энергии прямого инициирования детонации в водородно-воздушных смесях со стехиометрическим коэффициентом от 0,75 до 1,5 составляют от 10 до 1 000 кДж.

В [48] сообщается, что, обеспечивая безопасность производственных процессов и оборудования, всегда необходимо учитывать конкретную производственную ситуацию, так как реальная энергия инициирования взрыва одного и того же вещества может существенно отличаться от стандартизованной.

В [82] сообщается, что:

– защитные мероприятия по предотвращению поджигания взрывчатых смесей зарядами статического электричества проводятся в двух направлениях: предотвращение образования зарядов и их нейтрализация;



– для уменьшения электризации вводят ограничения допустимых скоростей течения диэлектрических жидкостей в трубопроводах. Поскольку распыление благоприятствует электризации, горючие жидкости, контактирующие с воздухом, полагается разливать без разбрызгивания по трубам, доходящим до дна заполняемого резервуара;

– взрывоопасный газовый поток не должен содержать распыляемых капель и твердых частиц, которые могут образовываться также и при конденсации после сильного охлаждения вследствие дросселирования.

В [48] обобщены следующие группы технических средств, используемых для устранения внешних источников воспламенения:

– взрывозащита электрооборудования: использование пускорегулирующей взрывозащищенной аппаратуры, взрывозащищенных электронагревательных элементов, взрывозащищенных вентиляторов;

– молниезащита;

– отвод и нейтрализация зарядов статического электричества, повышение проводимости и улучшение антистатических свойств диэлектриков.

## **6.7. Совокупность критических значений параметров**

В соответствии с требованием п. 3.3 [2] к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов для каждого технологического процесса определяется совокупность критических значений параметров.

Выполнение этого требования связано с:

– установлением необходимого и достаточного количества параметров (входящих в требуемую совокупность), для которых следует определять критические значения;

– обоснованием возможности пренебрежения влиянием других технологических параметров на условия самовоспламенения или взрыва технологической среды;

– установлением критических значений для каждого из вошедших в установленную совокупность технологических параметров;

– учетом функциональных зависимостей между критическими значениями всех параметров, вошедших в установленную в соответствии с требованием совокупность.

Простейшим вариантом представляется случай, когда требуемая совокупность содержит всего один параметр.

Например, исходя из опыта работы, авторы [34] полагают, что для оценки безопасных условий эксплуатации и вероятности возникновения аварий на объектах РХП необходимой и достаточной для газовых смесей является величина НКПВ по содержанию горючего.

Рассмотрим допустимость такого подхода на примере учета функциональных зависимостей между критическими значениями трех параметров: соотношения между горючим веществом и окислителем, давлением и температурой технологического процесса.

На рис. 56 представлены взаимосвязанные между собой общими осями координат: давление ( $P$ ) – температура ( $T$ ) – состав бинарной системы горючее вещество – окислитель ( $\varphi$ ) – графики, на которых изображены границы области самовоспламенения газовой смеси, изменяющиеся при изменении значений указанных параметров технологического процесса.

На правом верхнем графике рис. 19 с координатами давление – температура показано направление изменения третьего предела самовоспламенения газовой смеси, который определяет возможность возникновения теплового взрыва, применительно к трем значениям соотношения между горючим веществом и окислителем:  $\varphi_0$ ,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .

При этом состав реакционной системы, соответствующий значению  $\varphi_0$ , относится к оптимальному соотношению между горючим веществом и окислителем (равному стехиометрическому соотношению или близкому к нему), при котором развивается наибольшая скорость протекания взаимодействия.

Составы реакционной системы, соответствующие значениям  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , относятся к последовательному увеличению избытка одного из компонентов по сравнению с оптимальным соотношением реагентов  $\varphi_0$ .

Для определенности пусть значения  $\varphi$  соответствуют нижнему концентрационному пределу распространения пламени в данной газовой смеси ( $\varphi_2 < \varphi_1 < \varphi_0$ ).

Взаимное расположение линий 1–6, 4–7 и 5–8 на рассматриваемом графике показывает, что по мере увеличения избытка окислителя по отношению к оптимальному соотношению реагентов  $\varphi_0$  границы области самовоспламенения данной газовой смеси будут смещаться в направлении

более высоких значений температуры и давления: например, при температуре  $T_1$  от  $P_3$  до  $P_0$ , а при давлении  $P_1$  от  $T_3$  до  $T_6$ .

Таким образом, границы области самовоспламенения, обозначенные линией 1–6 на рассматриваемом графике, будут характеризоваться как предельные для данной газовой смеси по отношению к изменению ее давления и температуры (но могут не являться предельными при одновременном изменении других параметров, например, при увеличении масштаба технологического процесса). Поэтому для данных условий в области более низких значений давления и температуры, по сравнению с расположением линий 1–6, самовоспламенение данной газовой смеси или возникновение ее теплового взрыва произойти не может (например, при температуре  $T_1$  и давлении  $P_1$  или  $P_2$ ; при давлении  $P_1$  и температуре  $T_1$  или  $T_2$ ).

На нижнем графике рис. 56 показано соответствующее рассмотренным границам третьего предела самовоспламенения изменение значений концентрационных пределов с изменением температуры применительно к двум значениям давления газовой смеси:  $P_1$  и  $P_3$ .

Согласно графическим построениям, при давлении  $P_1$  зависимость НКПВ данной газовой смеси от температуры будет соответствовать линии 6–8, а при большем давлении  $P_3$  – линии 1–3.

Условно симметрично зависимости НКПВ от температуры на данном графике изображена и зависимость ВКПВ газовой смеси от температуры (для более определенного построения зависимости ВКПВ данной газовой смеси от температуры потребовались бы, кроме линии 1–6 на верхнем правом графике, границы третьего предела самовоспламенения для конкретных значений избытка горючего вещества).

Одинаковые цифры на всех графиках, изображенных на рис. 56, соответствуют одинаковым значениям каждого набора из трех варьируемых параметров: 1 –  $\varphi_0$ ,  $T_1$ ,  $P_3$ ; 2 –  $\varphi_1$ ,  $T_2$ ,  $P_3$  и т. д.

В соответствии с нижним графиком на рис. 56:

– увеличение давления газовой смеси приводит к расширению области температур, в которой возможно ее самовоспламенение и тепловой взрыв ( $T_1 < T_6$ ;  $T_2 < T_7$ );

– значение  $T_1$  при  $P_3$  (точка 1) и  $T_3$  при  $P_1$  (точка 6) являются предельными значениями; ниже этих значений температур для данных значений давления самовоспламенение газовой смеси и ее тепловой взрыв становятся невозможными событиями;

– увеличение температуры способно существенно снизить НКПВ (повысить ВКПВ) газовой смеси ( $\varphi_0$  при  $T_1$ ;  $\varphi_1 < \varphi_0$  при  $T_2$ ;  $\varphi_2 < \varphi_1$  при  $T_5$ ) при относительно низких температурах, близких к предельным температурам.

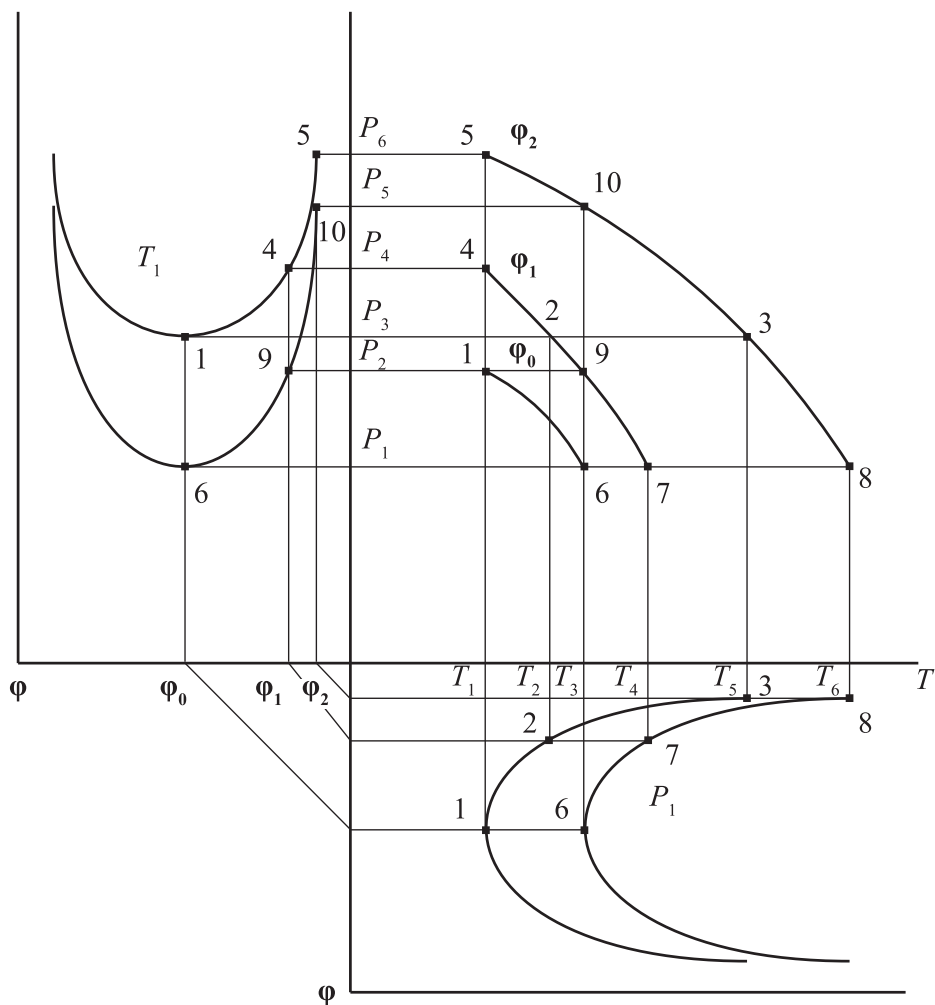


Рис. 56. Взаимосвязь между концентрационными и температурными пределами самовоспламенения взрывоопасных газовых смесей

Аналогичные графические построения были использованы для установления зависимостей концентрационных пределов самовоспламенения от давления применительно к двум значениям температуры ( $T_1$  и  $T_3$ ), как это показано на верхнем левом графике рис. 56.

Как следует из данного графика:

– увеличение температуры газовой смеси приводит к расширению области давлений (соответствующей третьему пределу самовоспламенения), в которой возможно ее самовоспламенение и тепловой взрыв ( $P_1 < P_3$ ;  $P_2 < P_4$ );

– значения  $P_3$  при  $T_1$  (точка 1) и  $P_1$  при  $T_3$  (точка 6) являются предельными значениями, ниже этих давлений при данных температурах самовоспламенение газовой смеси и ее тепловой взрыв становятся невозможными событиями;

– увеличение давления способно существенно снизить НКПВ (повысить ВКПВ) газовой смеси ( $\varphi_0$  при  $P_1$ ;  $\varphi_1 < \varphi_0$  при  $P_2$ ;  $\varphi_2 < \varphi_1$  при  $P_6$ ) при относительно низких давлениях, близких к их предельным значениям.

Таким образом, можно прийти к заключению, что в общем случае (если значения других параметров гарантированно не могут попадать в область самовоспламенения) совокупность критических значений параметров не следует ограничивать критическим значением одного технологического параметра.

Изложенный применительно к  $P$ – $T$ – $\varphi$  диаграммам подход к определению критических значений, относящихся к границам области самовоспламенения (или взрываемости), можно распространить и на другие параметры, изменение которых способно вызвать самовоспламенение технологической среды.

Так, на рис. 57 показаны аналогичные взаимосвязанные функциональные зависимости для пылегазовых смесей и пирофорных материалов между размером частиц  $d$ , температурой  $T$  и соотношением горючее вещество – окислитель  $\varphi$ .

Согласно верхнему правому графику на рис. 57:

– уменьшение размера частиц приводит к снижению температуры их самовоспламенения:  $T_5$  при  $d_6$  (точка 1);  $T_1 < T_5$  при  $d_1 < d_6$  (точка 7);

– увеличение избытка одного из компонентов реакционной смеси приводит к уменьшению области самовоспламенения в направлении повышения температуры самовоспламенения и уменьшения размера частиц ( $T_5 > T_1$  при  $d_1$ ;  $d_1 < d_6$  при  $T_5$ );

– зависимость между температурой самовоспламенения и размером частиц, соответствующая оптимальному соотношению реагентов (линия 7–4), является предельной; за ее пределами при более низких значениях температуры и больших размерах частиц самовоспламенение реакционной смеси и ее тепловой взрыв становятся невозможными событиями.

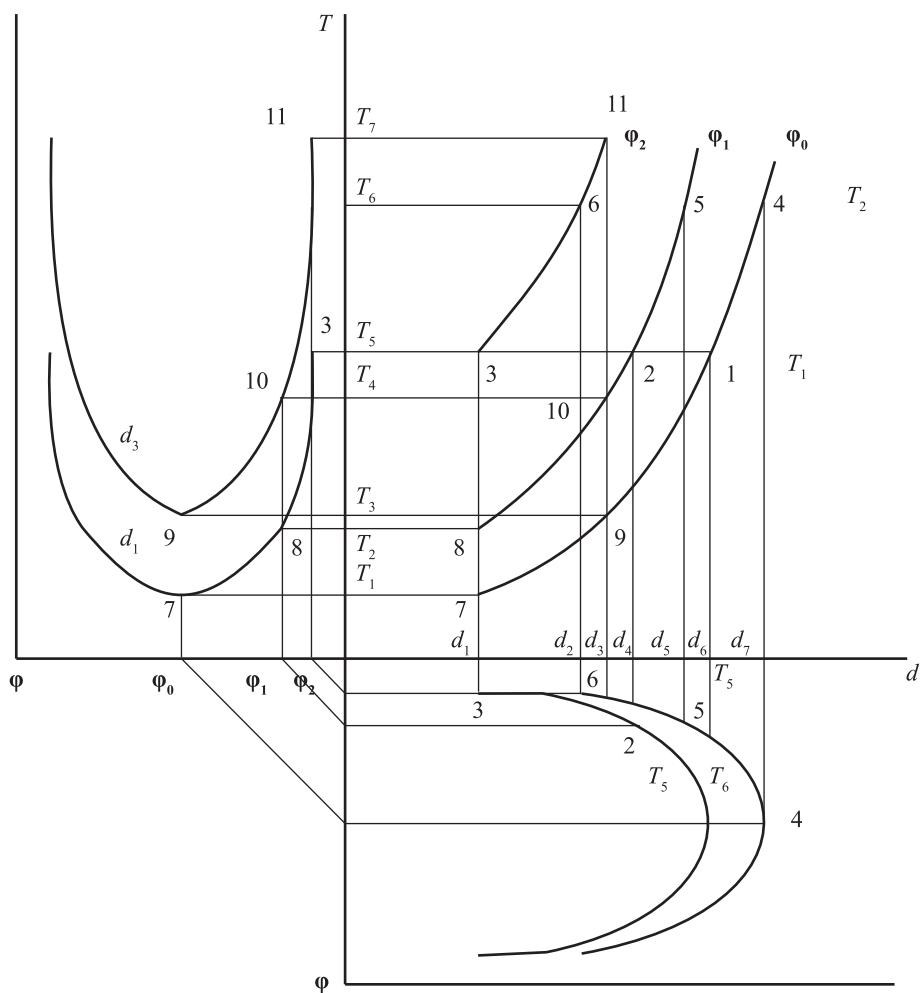


Рис. 57. Взаимосвязь между концентрационными и температурными пределами самовоспламенения и дисперсным составом взрывоопасной пылевой смеси (пирофорным материалом)

В соответствии с нижним правым графиком на рис. 57:

– увеличение температуры ( $T_6 > T_5$ ) приводит к расширению области самовоспламенения реакционной смеси в направлении увеличения критического размера частиц горючего вещества (например,  $d_7 > d_6$  (точки 4 и 1),  $d_5 > d_4$  (точки 5 и 2));

– увеличение избытка одного из реагентов приводит к существенному уменьшению критического размера частиц: например,  $d_6$  при  $\varphi_0$  (точка 1);  $d_4 < d_6$  при  $\varphi_1$  (точка 2);  $d_1 < d_4$  при  $\varphi_2$  (точка 3).

На левом верхнем графике рис. 57 показано, что:

– для каждого размера частиц существует предельное значение температуры, ниже которого самовоспламенение и тепловой взрыв реакционной системы становится невозможным событием для любого соотношения реагентов:  $T_1$  для  $d_1$  (точка 7);  $T_3$  для  $d_3$  (точка 9).

Очевидно, что в таком случае становится возможным объединение диаграмм  $P$ – $T$ – $\varphi$  и  $d$ – $T$ – $\varphi$  в одну диаграмму  $P$ – $T$ – $\varphi$ – $d$ , а ее дополнить диаграммами, включающими другие рассмотренные в данном разделе технологическими параметрами, влияющими на самовоспламенение (взрываемость) технологической среды.

## Глава 7.

### Рекомендации по обеспечению взрывопожаробезопасности объектов ядерного топливного цикла

#### 7.1. Рекомендации по оценке взрывопожаробезопасности технологических процессов радиохимических производств

##### 7.1.1. Структура рекомендаций

Рекомендации по обеспечению ПВБ технологических процессов РХП изложены в РБ [16].

В состав данного РБ [16] входят следующие разделы и приложения:  
«Общие положения»;

«Потенциально пожаровзрывоопасные технологические процессы радиохимических производств предприятий ядерного топливного цикла»;

«Характеристики веществ и смесей, необходимые для оценки пожаровзрывоопасности технологических процессов»;

«Условия возникновения воспламенения или взрыва при проведении технологических процессов радиохимических производств предприятий ядерного топливного цикла»;

«Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности при проведении технологических производств предприятий ядерного топливного цикла»;

Приложение № 1 «Перечень потенциально пожаровзрывоопасных технологических производств предприятий ядерного топливного цикла»;

Приложение № 2 «Пожаровзрывоопасные характеристики веществ и смесей, используемых в технологических производствах радиохимических производств»;

Приложение № 3 «Условия возникновения воспламенения и (или) взрыва при проведении технологических процессов радиохимических производств»;

Приложение № 4 «Положения, которые рекомендуется включать в обосновывающие документы, представляемые эксплуатирующей организацией для получения лицензии на виды деятельности в области использования атомной энергии, а также в экспертное заключение о ПВБ технологических процессов».



### **7.1.2. Область применения рекомендаций**

В общих положениях [16] приведено, что рекомендации распространяются на ОЯТЦ, связанные со следующими технологическими операциями РХП:

- хранение отработавших тепловыделяющих сборок;
- растворение металлосодержащего сырья;
- фильтрование;
- переработка методами жидкостной экстракции и сорбции;
- подготовка исходных растворов, а также растворов, содержащих восстановители и окислители;
- образование и применение газовоздушных систем;
- использование осадительных процессов с последующей прокалкой осадков;
- хранение отработавших растворов, перлитных суспензий, используемых в процессах передела;
- упаривание высокоактивных и среднеактивных растворов.

### **7.1.3. Рекомендации по отнесению технологических процессов радиохимических производств к пожаровзрывоопасным**

В [16] рекомендуется считать потенциально пожаровзрывоопасными технологические процессы РХП, если при их проведении:

- образуются или используются горючие газы (водород, аммиак, метан, оксид углерода и др.);
- используются горючие жидкости (экстрагенты, углеводородные разбавители и другие органические жидкости);
- используются смеси восстановителей с азотнокислыми окислителями (смеси экстрагентов и органических сорбентов с азотной кислотой и нитратами; азотнокислые растворы, содержащие органические продукты и др.).

В перечень таких технологических процессов рекомендовано включать процессы, содержащие следующие операции:

- растворение отработавшего ядерного топлива;
- осветление растворов (фильтрование);

- отделение урана и плутония от других актинидов и продуктов деления методом жидкостной экстракции;
- получение плава уранилнитрата;
- аффинаж плутония;
- сорбционное извлечение продуктов деления;
- хранение высокоактивных жидких растворов, перлитных суспензий, отработавшего экстрагента;
- упаривание растворов средней активности и высокоактивных растворов;
- остекловывание высокоактивных отходов;
- денитрация плава уранилнитрата;
- приготовление раствора гидразиннитрата;
- упаривание азотнокислых растворов, содержащих восстановители;
- электрохимическое и каталитическое восстановление урана;
- использование гидразина в качестве восстановителя.

В качестве объектов, содержащих потенциальные источники аварий, рекомендуется рассматривать:

- промышленные аппараты (растворители, экстракторы, сорбционные колонны, емкости для хранения отходов, выпарные аппараты, денитраторы, фильтры и др.);
- системы вентиляции (общая, локальная), трубопроводы, газоходы;
- защитные камеры, боксы, рабочие помещения и каньоны, в которых находятся аппараты.

К потенциальной опасности указанных технологических операций в [16] относят:

- интенсивное газовыделение;
- выделение радиолитического водорода и метана;
- образование горючей смеси паров с воздухом;
- создание избыточного давления в аппарате за счет интенсивного газовыделения;
- осушение и нагрев за счет тепла радиоактивного распада;
- образование азотистоводородной кислоты и взрывоопасных азидов;
- возникновение теплового взрыва.

В качестве моделей аварий в [16] рекомендуется рассматривать:  
– дефлаграционный взрыв облаков газопаровоздушных смесей;  
– разрушение сосудов (резервуаров) под действием внутреннего давления.

#### ***7.1.4. Рекомендации по использованию показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов***

В качестве исходных характеристик, определяющих пожаровзрывобезопасные условия проведения технологических процессов с потенциально опасными химическими веществами и смесями, необходимыми и достаточными в [16], рекомендуется считать:

- для газовоздушных и газовых смесей – величины нижних концентрационных пределов распространения пламени;
- для горючих жидкостей – величины температуры вспышки и (или) нижнего температурного предела распространения пламени;
- для смесей восстановителей с азотнокислыми окислителями – скорость газовыделения, температура возникновения теплового взрыва, удельный объем парогазообразных продуктов экзотермических процессов окисления (тепловых взрывов).

Для экстракционных и сорбционных смесей РХП рекомендуется использовать следующие характеристики:

- в открытом сосуде температура начала газовыделения для смесей ТБФ и его растворов в углеводородных разбавителях с азотной кислотой концентрации 12 моль/л составляет 80–90 °С, максимальная скорость газовыделения для необлученных смесей: 1,5 л/мин·л экстрагента, для облученных: 4 л/мин·л экстрагента;
- в открытых сосудах температура начала газовыделения для смесей сорбентов с азотной кислотой концентрации 7 и 12 моль/л при наличии раствора между гранулами сорбента составляет соответственно 70 и 60 °С, максимальная скорость газовыделения для необлученных смесей при температуре 100 °С: 0,8–1,2 л/мин·л сорбента, для облученных: 2,3–2,5 л/мин·л сорбента;
- для смесей ТБФ и его растворов в углеводородных разбавителях с азотной кислотой концентрации 3–12 моль/л величины температур

возникновения теплового взрыва составляют 125–140 °С для необлученных смесей и 110–120 °С для облученных смесей, удельный объем парогазообразных продуктов после завершения теплового взрыва: 1,5–2,0 м<sup>3</sup>/л экстрагента;

– величины температур возникновения теплового взрыва смесей экстрагента (ТБФ) с уранилнитратом составляют 170–180 °С;

– аниониты в нитратной форме или с нитратным комплексом металлов в сухом состоянии воспламеняются при температуре 200–210 °С вне зависимости от герметичности сосуда;

– смеси анионитов с азотной кислотой после удаления водной фазы между гранулами сорбента способны к воспламенению при нагревании до температуры 130–150 °С (необлученные смеси) и 115–120 °С (облученные смеси), при этом герметичность сосуда не имеет значения. Удельный объем парогазообразных продуктов теплового взрыва анионита в нитратной форме составляет 0,15 м<sup>3</sup> на литр воздушно-сухого сорбента, для смесей его с 6–12 моль/л азотной кислотой: от 1,2 до 1,7 м<sup>3</sup> на литр воздушно-сухого сорбента.

#### ***7.1.5. Рекомендации по разработке технических и организационных мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств***

Технические и организационные мероприятия по обеспечению ПVB конкретных технологических процессов РХП рекомендуется разрабатывать на основе результатов анализа, включающего:

– анализ всех стадий технологического процесса на предмет пожаровзрывоопасности и выявление потенциально опасных веществ и смесей;

– расчетное или экспериментальное определение пожаровзрывоопасных характеристик обнаруженных потенциально опасных веществ и смесей;

– выявление условий реализации потенциальной опасности (воспламенения газопаровоздушных смесей, теплового взрыва конденсированных веществ и смесей);

– установление ПБЭ и (или) условий безопасной эксплуатации;

- разработку мероприятий по обеспечению условий безопасной эксплуатации;
- корректировку мероприятий по обеспечению условий безопасной эксплуатации на основании результатов промышленной «обкатки» технологического процесса;
- вероятностный анализ безопасности с привлечением информации об условиях возникновения аварий;
- оценку последствий аварий с использованием соответствующих характеристик.

#### ***7.1.6. Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств***

Их можно сгруппировать по следующим направлениям.

##### **1. Рекомендации по обеспечению соотношения компонентов:**

- содержание горючих газов в газовых смесях не должно превышать величины ПБЭ; величина ПБЭ не должна превышать 50 % величины нижних концентрационных пределов распространения пламени для горючего газа или смеси горючих газов с учетом динамики их выделения.
- пропускная способность сдувок аппаратов должна обеспечивать отвод выделяющихся газов в момент их максимального выделения.
- наличие органических веществ сверх пределов растворимости в азотнокислых растворах, подаваемых на высокотемпературные операции (упаривание, ректификация азотной кислоты, получение плава уранилнитрата, денитрация), должно быть исключено;
- содержание восстановителей при упаривании азотнокислых растворов должно быть ограничено такими величинами, чтобы в случае возникновения экзотермических процессов окисления восстановителей давление в аппарате не превысило допустимого.

##### **2. Рекомендации по обеспечению температуры процесса:**

- температура горючих жидкостей не должна превышать величины ПБЭ (величина ПБЭ принимается на 10 °С ниже наименьшей температуры жидкости, при которой происходит воспламенение паровоздушных смесей);

– нагревание в закрытых аппаратах азотнокислых растворов до температур выше 120 °С должно быть исключено.

3. Рекомендация по обеспечению времени процесса:

– время нахождения смесей экстрагентов, сорбентов и восстановителей в закрытых аппаратах должно быть обусловлено технологической необходимостью при контроле за температурой содержимого и давлением в аппарате.

4. Рекомендации по обеспечению влажности компонентов:

– хранение сорбентов в нитратной форме допускается при влажности не менее 50 %;

– осушение органических сорбентов, содержащих нитратные группы, должно быть исключено;

– высушивание смесей органических веществ (восстановителей) с нитратами с последующим нагреванием должно быть исключено;

– при хранении растворов и суспензий не допускается осушение осадков.

#### ***7.1.7. Рекомендации по составу и содержанию документации, обосновывающей пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств***

Рекомендуется провести независимую экспертную оценку организационно-технических мероприятий по обеспечению ПВБ технологических процессов.

В целях обеспечения всесторонней и качественной оценки ПВБ технологических процессов РХП в обосновывающие документы, представляемые эксплуатирующей организацией для получения лицензии на виды деятельности в области использования атомной энергии, а также в экспертное заключение о ПВБ технологических процессов, рекомендуется включать следующие положения.

По составу и содержанию документации о технологическом процессе рекомендуется:

– определить суть процесса (для каких целей предназначен);

– предоставить сведения об используемых и образующихся в процессе химических веществах или смесях и их количествах;

- приводить информацию о пожаровзрывоопасных характеристиках потенциально опасных веществ и смесей и об условиях реализации потенциальной опасности в форме горения, создания избыточного давления или взрыва;
- указать скорость выделения радиолитического водорода и содержание горючих газов в газоздушных смесях;
- привести аппаратурную схему процесса (порядок работы, содержимое, связь с другими аппаратами);
- привести характеристики аппаратов, в которых находятся химические вещества или смеси (объем, степень заполнения, наличие контрольно-измерительных приборов и места их расположения, герметичность, наличие сдувок, систем «нагрев – охлаждение», коммуникации приема и выдачи продуктов) и их связь с другими аппаратами;
- предоставлять информацию об основных параметрах процесса (концентрация компонентов и наличие входного контроля за ними, температура, давление, наличие катализаторов и т. д.);
- указать максимальные отклонения параметров процесса от регламентных величин;
- привести информацию о ПБЭ и (или) условиях безопасной эксплуатации;
- предоставить сведения о проводимых организационно-технических мероприятиях по обеспечению условий безопасной эксплуатации;
- привести перечень документов, обосновывающих ПВБ процесса (заключение о ПВБ, рекомендации о безопасных условиях проведения процессов, справки о результатах анализов и (или) испытаний свойств потенциально опасных веществ и их смесей, отчеты о результатах расчетов и (или) экспериментов, отчеты по научно-исследовательским работам, выполненные эксплуатирующей организацией и (или) другими организациями);
- привести перечень имевших место аварийных ситуаций и/(или) отклонений при проведении данного процесса.

Рекомендации по составу и содержанию экспертного заключения о ПВБ технологических процессов РХП включают следующие положения:

– в преамбулу заключения рекомендуется включить описание процесса, соответствующее приведенному в обосновывающих документах, представленных эксплуатирующей организацией;

– на основании анализа представленной информации рекомендуется указать потенциально опасные вещества и их смеси, технологические операции, в которых они используются и (или) образуются;

– информация о результатах расчетного и (или) экспериментального определения пожаровзрывоопасных свойств потенциально опасных веществ, их смесей, об условиях, при которых реализуется потенциальная опасность в форме горения, создания избыточного давления или взрыва может быть основой для оценки экспертной организацией надежности и достаточности организационно-технических мероприятий по обеспечению ПБЭ (если они установлены) и условий безопасной эксплуатации. При недостаточности этих мероприятий могут быть выданы соответствующие рекомендации по обеспечению ПБЭ и условий безопасной эксплуатации;

– отдельной строкой рекомендуется формулировать вывод о соответствии (или несоответствии) условий проведения технологического процесса условиям безопасной эксплуатации.

## **7.2. Рекомендации по оценке пожаровзрывоопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива**

### **7.2.1. Структура рекомендаций**

Рекомендации по оценке пожаровзрывоопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива изложены в РБ [88].

В состав данного РБ [88] входят следующие разделы и приложения:

«I. Общие положения»;

«II. Общие рекомендации»;

«III. Рекомендации по этапам оценки пожаровзрывоопасности сорбционных систем»;



«Приложение 1. Термины и определения»;

«Приложение 2. Схема проведения оценки пожаровзрывоопасности сорбционной системы при переработке отработавшего ядерного топлива»;

«Приложение 3. Оценка адиабатического периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций»;

«Приложение 4. Оценка критической температуры теплового взрыва от протекания неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду»;

«Приложение 5. Оценка периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду»;

«Приложение 6. Оценка влияния отклонений параметров технологического процесса на пожаровзрывоопасность сорбционных систем».

### ***7.2.2. Область применения рекомендаций***

Рекомендации по оценке пожаровзрывоопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива разработаны в целях содействия соблюдению п. 6.7.7.1–6.7.7.3 и 6.7.11 ФНП [38], а именно:

– обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ должно проводиться при наличии или образовании в технологических процессах химических веществ и смесей, способных к экзотермическому разложению или взаимодействию с выделением значительного объема газообразных продуктов;

– в проекте ОЯТЦ должно быть представлено обоснование исходных событий, которые могут привести к образованию взрывоопасных веществ и смесей и развитию неуправляемых химических экзотермических реакций;

– обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ должно быть проведено на основе способности к экзотермическому разложению и условий возникновения химической экзотермической реакции;

– в технологических процессах, в которых возможно развитие неуправляемых химических экзотермических реакций, должны предусматриваться технические средства и способы, предотвращающие их развитие.

РБ [88] содержит рекомендации по проведению оценки пожаровзрывоопасности систем, предназначенных для выполнения функций разделения/очистки сорбционными методами, на проектируемых, сооружаемых и эксплуатируемых ОИАЭ, осуществляющих переработку отработавшего ядерного топлива.

### ***7.2.3. Общие рекомендации***

В соответствии с п. 8 [88] оценку пожаровзрывоопасности сорбционных систем рекомендуется проводить с учетом:

- свойств потенциально опасных веществ и материалов, находящихся в сорбционных системах;
- проектно-конструкторской и эксплуатационной документации по сорбционным системам;
- актов испытаний и другой документации по техническому обслуживанию и ремонту систем (элементов) безопасности и элементов, важных для безопасности ОЯТЦ, включающих сорбционные системы;
- информации об отказах элементов систем, важных для безопасности, и ошибках персонала на ОЯТЦ, включающих сорбционные системы;
- сведений о расследовании нарушений и анализа отклонений в работе сорбционных систем;
- сведений о нарушении пределов и условий безопасной эксплуатации.

В п. 9 [88] сообщается, что допущения, принятые при выполнении оценки взрывопожароопасности сорбционных систем ОЯТЦ, рекомендуется обосновывать.

#### ***7.2.4. Рекомендации по этапам оценки взрывопожароопасности сорбционных систем***

В соответствии с разделом III [88] оценку пожаровзрывоопасности сорбционных систем, используемых при переработке отработавшего ядерного топлива, рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- выявление потенциально опасных веществ и материалов;
- оценка тепловых эффектов и объема газообразных продуктов неуправляемых реакций, способных протекать в сорбционной системе;
- оценка адиабатической (максимально возможной) температуры и объема газообразных веществ, находящихся в сорбционной системе, достигаемой в результате протекания неуправляемых реакций;
- оценка адиабатического (минимально возможного) периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций;
- оценка критической температуры теплового взрыва от протекания неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду;
- оценка периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду;
- оценка влияния отклонений параметров технологического процесса на пожаровзрывоопасность сорбционных систем.

При выявлении потенциально опасных веществ и материалов в [88] рекомендуется оценить состав, представляющий наибольшую опасность при проведении технологической операции.

Для этого рекомендуется рассмотреть вещества и материалы с максимальной концентрацией окислителя и восстановителя, с максимальным удельным тепловыделением вследствие радиоактивного распада, с минимальной теплопроводностью, другие вещества и материалы, представляющие опасность из-за возможности протекания неуправляемых реакций.

При оценке тепловых эффектов и объема газообразных продуктов неуправляемых реакций, способных протекать в сорбционной системе, в [88] рекомендуется при отсутствии необходимых данных о продуктах реакций составить уравнения химических реакций, руководствуясь

принципом максимального тепловыделения, при котором в качестве продуктов реакций задаются вещества с наименьшей суммой энтальпий образования.

При отсутствии необходимых термодинамических данных для расчета теплового эффекта неуправляемых реакций с целью их определения рекомендуется использовать экспериментальные методы, методы расчета, методы сравнительного анализа.

На основании результатов оценки адиабатической (максимально возможной) температуры, достигаемой в результате протекания неуправляемых реакций, и объема газообразных веществ, находящихся в сорбционной системе в [88], рекомендуется:

– перейти к проведению оценки влияния отклонений параметров технологического процесса на взрывопожароопасность сорбционных систем, если для заданного состава рассчитанные значения адиабатической температуры, объема и давления (в случае возможной герметизации колонны) газообразных продуктов неуправляемых реакций, концентрация горючих газов – меньше установленных для сорбционной системы ПБЭ по соответствующим параметрам;

– если больше – перейти к оценке адиабатического (минимально возможного) периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций.

Для проведения оценки адиабатического (минимально возможного) периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций в [82] рекомендуется создать кинетическую модель неуправляемых реакций и определить ее параметры, позволяющие рассчитывать изменение температуры и глубины превращения во времени.

На основании результатов оценки адиабатического (минимально возможного) периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций:

– перейти к проведению оценки влияния отклонений параметров технологического процесса на взрывопожароопасность сорбционных систем, если полученное значение адиабатического периода индукции теплового взрыва для начальной температуры смеси, равной регламентной, больше времени осуществления технологической операции в сорбционной системе, а достигаемые за время осуществления операции такие параметры, как температура, объем и давление (в случае возможной герметизации

колонны) газообразных продуктов, концентрация горючих газов, меньше установленных для сорбционной системы ПБЭ по соответствующим параметрам;

– если больше – перейти к проведению оценки критической температуры теплового взрыва от протекания неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду.

На основании результатов оценки критической температуры теплового взрыва от протекания неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду в [88]:

– перейти к проведению оценки влияния отклонений параметров технологического процесса на взрывопожароопасность сорбционных систем, если температура проведения технологической операции (стенки сорбционной колонны) ниже критической температуры теплового взрыва, а достигаемые за время осуществления операции такие параметры, как температура, объем и давление (в случае возможной герметизации колонны) газообразных продуктов, концентрация горючих газов, меньше установленных ПБЭ для сорбционной системы по соответствующим параметрам;

– если больше – перейти к проведению оценки периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду.

На основании результатов оценки периода индукции теплового взрыва от протекания в сорбционной системе неуправляемых реакций в условиях тепловых потерь в окружающую среду в [88] рекомендуется:

– перейти к проведению оценки влияния отклонений параметров технологического процесса на взрывопожароопасность сорбционных систем, если определенное значение периода индукции больше времени осуществления технологической операции в сорбционной системе, а достигаемые за время осуществления операции такие параметры как температура, объем и давление (в случае возможной герметизации колонны) газообразных продуктов, концентрация горючих газов меньше установленных ПБЭ для сорбционной системы по соответствующим параметрам;

– если больше – считать сорбционную систему взрывопожароопасной и принять меры по предотвращению ее взрывопожароопасности.

При проведении оценки влияния отклонений параметров технологического процесса на взрывопожароопасность сорбционных систем в [88] рекомендуется:

- сформировать перечень возможных отклонений параметров технологического процесса на основании опыта эксплуатации сорбционной системы, анализа отклонений для аналогичных технологических процессов, консервативных предположений по отказу систем (элементов);
- обратить особое внимание на отклонения параметров системы от параметров нормальной эксплуатации, приводящие к образованию не рассмотренных потенциально опасных веществ и материалов; к таким отклонениям, в том числе, следует отнести: растворы с повышенной кислотностью; радиогенные источники тепла повышенной интенсивности; ошибки в последовательности и/(или) в составе исходных/дозиметрических компонентов; частичное или полное осушение сорбентов;
- рассмотреть влияние единичных и множественных отклонений параметров технологического процесса от параметров нормальной эксплуатации на безопасность сорбционной системы и составить перечень сценариев возникновения неуправляемых реакций, достижения концентрации горючих газов и других параметров процесса ПБЭ, перечень принимаемых организационно-технических мер, предотвращающих реализацию аварийных сценариев.

### **7.3. Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности процессов с применением пирофорных материалов на объектах ядерного топливного цикла**

#### **7.3.1. Структура рекомендаций**

Рекомендации по обеспечению ПВБ технологических процессов с применением пирофорных материалов на ОЯТЦ изложены в РБ [89].

В состав данного РБ входят следующие разделы и приложения.

«I. Назначение и область применения»;

«II. Рекомендации по контролю за фракционным составом и удельной поверхностью пирофорных материалов»;

«III. Рекомендации по обеспечению безопасных условий при обращении с пирофорными материалами»;

«IV. Рекомендации по обоснованию безопасных условий при обращении с пирофорными материалами»;  
«V. Рекомендации по установлению показателей пожаровзрывоопасности пирофорных материалов»;  
«VI. Рекомендации по установлению критериев безопасности при обращении с пирофорными материалами»;  
«VII. Рекомендации по сбору, систематизации и хранению данных по условиям самовоспламенения пирофорных материалов»;  
«Приложение 1. Термины и определения»;  
«Приложение 2. Перечень пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах объекта ядерного топливного цикла»;  
«Приложение 3. Показатели и характеристики пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах объекта ядерного топливного цикла»;  
«Приложение 4. Перечень критериев оценки пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах объекта ядерного топливного цикла»;  
«Приложение 5. Рекомендуемые методы контроля за показателями пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах объекта ядерного топливного цикла»;  
«Приложение 6. Перечень нормативных документов, рекомендуемых для использования при обеспечении пожаровзрывобезопасности технологических процессов с применением пирофорных материалов на объектах ядерного топливного цикла».

### ***7.3.2. Назначение и область применения***

Рекомендации по обеспечению ПVB технологических процессов с применением пирофорных материалов на ОЯТЦ разработаны в целях содействия соблюдению требований пп. 6.7.7.1 и 6.7.7.3 ФНП [38] в части, касающейся пирофорных материалов, а именно:

– обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ должно проводиться при наличии или образовании в технологических процессах пирофорных материалов;

– обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов ОЯТЦ должно быть проведено для пирофорных материалов на основе условий самовоспламенения.

Действие РБ [89] распространяется на действующие, сооружаемые, проектируемые и выводимые из эксплуатации ОЯТЦ, на которых осуществляют технологические процессы с применением пирофорных материалов.

Рекомендации данного руководства предназначены для применения при формировании требований эксплуатирующей организации к разработке технологических процессов с участием пирофорных материалов для ОЯТЦ.

Согласно приложению № 2 к настоящей книге при обращении с ядерным топливом и оболочками твэлов в качестве промежуточных и примесных веществ на ОЯТЦ применяются и образуются следующие материалы, которые в мелкодисперсном состоянии (или при большой удельной поверхности) способны проявлять пирофорные свойства, то есть самовоспламеняться на воздухе при комнатной температуре и атмосферном давлении:

- металлический уран;
- диоксид урана;
- гидрид урана;
- мононитрид урана;
- монокарбид урана;
- металлический плутоний;
- полуторный оксид плутония;
- металлический цирконий;
- губка металлического циркония;
- гидрид циркония;
- мононитрид плутония;
- смешанный нитрид урана и плутония.



### ***7.3.3. Рекомендации по контролю за фракционным составом и удельной поверхностью пирофорных материалов***

К одному из основных показателей пожаровзрывоопасности пирофорных материалов относится размер частиц. Способность пирофорных материалов самовоспламеняться на воздухе при комнатной температуре и атмосферном давлении проявляется при уменьшении размера частиц и, соответственно, при увеличении их удельной поверхности, на которой протекают экзотермические реакции окисления. Поэтому условия самовоспламенения пирофорного материала во многом зависят от его фракционного состава, показывающего долю мелкодисперсных частиц, способных проявлять пирофорные свойства.

В [89] применительно к пирофорным материалам, используемым и образуемым в технологических процессах ОЯТЦ, рекомендуются следующие меры по обеспечению контроля за их фракционным составом и удельной поверхностью:

- предусматривать системы контроля за фракционным составом и удельной поверхностью пирофорных материалов в проекте ОЯТЦ;

- при разработке технологического процесса с участием пирофорных материалов определять изменения их фракционного состава и удельной поверхности при изменении условий осуществления технологического процесса и ограничивать измельчение материала;

- осуществлять контроль за фракционным составом и удельной поверхностью пирофорного материала до и после проведения технологического процесса с их участием, а также при определении наличия (выхода) пирофорных материалов в помещении, в котором проводится технологический процесс, трубопроводах, системе вентиляции, фильтрах;

- при выборе способа получения пирофорных материалов отдавать предпочтение способу, согласно которому образуются частицы пирофорного материала с наименее реакционными поверхностями частиц (сфероидальной формы);

- при осуществлении технологического процесса с участием пирофорных материалов снижать их общую удельную поверхность за счет разбавления непирофорными частицами этого материала;

– при хранении пирофорного материала снижать его общую удельную поверхность посредством его безопасного компактирования.

#### ***7.3.4. Рекомендации по обеспечению безопасных условий при обращении с пирофорными материалами***

Для обеспечения безопасных условий при обращении с пирофорными материалами на ОЯТЦ и предотвращению условий их воспламенения в [89] приведены три группы рекомендаций:

- по предотвращению контакта пирофорных материалов с воздухом и реакционноспособными веществами;
- по уменьшению количества применяемого пирофорного материала;
- по предотвращению источников зажигания и саморазогрева пирофорного материала.

Для предотвращения контакта пирофорных материалов с воздухом и реакционноспособными веществами, применяемыми на ОЯТЦ, и, следовательно, для предотвращения их самовоспламенения и взрыва в [89] рекомендуется:

- исключать контакт пирофорного материала с воздухом или ограничивать время такого контакта для предотвращения самовоспламенения пирофорного материала на воздухе;
- для исключения достижения концентрационного предела распространения пламени ограничивать или исключать возникновение потока воздуха внутри аэрогеля пирофорного материала;
- осуществлять обращение с пирофорным материалом в инертной среде для исключения достижения концентрационного предела распространения пламени или минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора;
- исключать контакт пирофорного материала с энергично взаимодействующими с ним веществами (гидрида урана с хлорорганическими соединениями, урана с диоксидом углерода), способными вызывать самовоспламенение и инициировать взрыв;
- не допускать смешение различных пирофорных материалов, один из которых способен энергично взаимодействовать с компонентами

технологической среды в режиме горения или взрыва (осуществлять контроль за содержанием гидрида урана в нитриде урана, получаемом из гидрида урана);

– при обращении с пирофорным нитридом урана совместно с хлорорганическими соединениями не использовать нитрид урана, полученный из гидрида урана, для исключения взаимодействия гидрида урана с хлорорганическими соединениями в режиме горения и взрыва;

– при получении нитрида урана из гидрида урана установить гарантированное безопасное время для завершения процесса (с целью снижения содержания гидрида урана в нитриде урана и исключения взаимодействия примеси гидрида урана в нитриде урана с хлорорганическими соединениями в режиме горения и взрыва);

– при обращении с нитридом урана, полученном из гидрида урана, исключить возможность его контактирования с хлорорганическими соединениями в случае отсутствия данных о содержании гидрида урана в нитриде урана;

– принимать меры по исключению возможности разгерметизации контейнера, содержащего пирофорный материал, при его транспортировании.

Для уменьшения количества применяемого пирофорного материала с целью уменьшения их потенциальной пожаровзрывоопасности в [89] рекомендуется:

– ограничивать количество и (или) концентрации используемого пирофорного материала в составе технологической среды до минимально необходимого значения;

– ограничивать содержание аэрогеля и аэровзвеси пирофорного материала в производственном помещении посредством систематической уборки помещения;

– обеспечить контроль герметичности оборудования для сведения к минимуму выхода пирофорного материала из камер в помещение;

– снижать концентрацию в пирофорном материале другого пирофорного материала, способного энергично взаимодействовать с компонентами технологической среды в режиме горения или взрыва (снижать концентрацию гидрида урана в нитриде урана, получаемого из гидрида урана);

– не допускать скопления азрогеля пирофорного материала на полу, оборудовании и инструменте.

Для предотвращения источников зажигания и саморазогрева пирофорного материала в [89] рекомендуется:

– при хранении пирофорного материала исключать воздействие на него источников тепла;

– работы с пирофорными материалами, предназначенными для использования при комнатной температуре, проводить вдали от горячих печей, нагретых предметов и возможных источников искр;

– при отделке помещений и конструкций технологических линий не допускать применения материалов, способных накапливать статическое электричество;

– предотвращать накопление в помещении (и на поверхности под пирофорным материалом) статического электричества;

– не допускать дефектов (трещин, раковин) на рабочей поверхности аппаратуры, соприкасающейся с пирофорным материалом;

– применять инструмент из латуни и алюминия;

– не допускать использования органического стекла или другого материала, аккумулирующего заряды электричества;

– при обращении с пирофорным материалом для снижения локального саморазогрева до температуры самовоспламенения – ограничивать воздействия, приводящие к деформации пирофорного материала и его интенсивному трению, образования в нем напряжений (трещин), в том числе посредством установления предельных значений скоростей, давлений, температур при перемещении пирофорного материала;

– в производственных помещениях, в которых осуществляются технологические процессы с участием пирофорных материалов, и в помещениях для хранения пирофорных материалов – нахождение работников (персонала) в обуви без металлических гвоздей, в одежде из ткани, исключающей накопление статического электричества.

### ***7.3.5. Рекомендации, относящиеся к обоснованию безопасных условий при обращении с пирофорными материалами***

Для обоснования безопасных условий при обращении с пирофорными материалами необходимо знание:

- значений показателей пожаровзрывоопасности данных пирофорных материалов и условий (методики) их определения;
- функциональных зависимостей между критическими значениями параметров, образующих границы областей самовоспламенения и взрыва;
- эксплуатационных значений параметров технологического процесса;
- специфичности (уникальности) некоторых реакционных систем, образующихся между компонентами технологических сред, в отношении перехода реакций окисления в режимы самовоспламенения или взрыва (например, особой реакционной способности гидрида урана в присутствии хлорорганических соединений).

В приложениях № 3 и 4 к настоящей книге приведены опубликованные данные по показателям и характеристикам пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах ОЯТЦ.

Недостаточный объем этих данных и отсутствие надежных зависимостей между критическими значениями параметров существенно затрудняют установление и обоснование безопасных условий осуществления технологических процессов с участием пирофорных материалов.

В приложении № 4 к настоящей книге приведен перечень критериев оценки пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах ОЯТЦ, которые можно использовать применительно к использованию ограниченного объема необходимых данных.

Например, критерием пожаровзрывоопасности технологического процесса с участием пирофорного материала для фиксированных значений: температуры технологического процесса, давления в технологическом оборудовании, соотношения пирофорного материала и окислителя в технологической среде, соотношения окислителя и инертного компонента (газа) в технологической среде, является размер частиц пирофорного

материала, при превышении которого частицы не способны самовоспламеняться при данных фиксированных значениях указанных технологических параметров.

В приложении № 5 к настоящей книге приведены стандартные методы определения показателей пожаровзрывоопасности, применимые для пирофорных материалов. Полученные этими методами значения показателей следует соотносить с реальными условиями осуществления технологических процессов на ОЯТЦ.

В разделе IV [89] приведены следующие рекомендации по обоснованию безопасных условий при обращении с пирофорными материалами:

– в ООБ приводить следующие характеристики применяемых пирофорных материалов: размер частиц, их удельную поверхность, температуру самовоспламенения, концентрационные пределы распространения пламени;

– в ООБ привести обоснование безопасных условий при обращении с пирофорными материалами в соответствии с критериями оценки пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах ОЯТЦ, примерный перечень которых приведен в приложении № 5 к настоящей книге;

– при отсутствии необходимых данных для пирофорного материала использовать обоснование безопасных условий, установленных для более пожаровзрывоопасного пирофорного материала.

Здесь следует отметить, что одним из наиболее пожаровзрывоопасных пирофорных материалов, применяемых на ОЯТЦ, является мелкодисперсный цирконий, при окислении которого на воздухе достигаются наиболее высокие значения температуры.

В разделе V [89] приведены следующие рекомендации по установлению показателей пожаровзрывоопасности пирофорных материалов:

– при установлении показателей пожаровзрывоопасности пирофорных материалов определять функциональные зависимости параметров, относящиеся к границе области самовоспламенения пирофорного материала;

– для оценки границ самовоспламенения пирофорного материала использовать теоретические зависимости температуры самовоспламенения

от размера частиц и зависимости концентрационных пределов распространения пламени от температуры;

– при экспериментальном установлении показателей пожаровзрывоопасности пирофорных материалов использовать меры по обеспечению взрывозащиты.

В разделе VI [89] приведены следующие рекомендации по установлению критериев безопасности при обращении с пирофорными материалами устанавливать критерии безопасности при обращении с пирофорными материалами в соответствии с критериями оценки пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах ОЯТЦ, примерный перечень которых приведен в приложении № 5 к настоящей книге.

В разделе VII [89] приведены следующие рекомендации по сбору, систематизации и хранению данных по условиям самовоспламенения пирофорных материалов для строящихся и проектируемых ОЯТЦ эксплуатирующей организации организовать систему сбора, обработки, систематизации, анализа и хранения информации по показателям пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых и образующихся на ОЯТЦ.

#### **7.4. Практические рекомендации по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла**

Помимо руководств по обеспечению безопасности, рекомендации по взрывобезопасному осуществлению химико-технологических процессов ОЯТЦ приводятся в различной научно-технической литературе, в которой анализируется опыт обеспечения взрывобезопасности на ОЯТЦ.

Например, в [59] приведены следующие рекомендации и сведения по соблюдению взрывобезопасности на предприятиях по переработке облученного ядерного топлива:

– взрывоопасность анионообменных смол заключается в том, что полистирольные дивинилбензолные полимеры с активными четвертично-аммониевыми группами при соприкосновении с окислителями, в первую очередь с азотной кислотой, при повышенной температуре подвержены взрывам.

Для устранения взрывоопасности процесса рекомендуется: концентрацию азотной кислоты не повышать более 7,5 М, не допускать применения таких сильных окислителей, как бихромат натрия; температурный режим поддерживать ниже 70 °С; в процессе эксплуатации колонн сводить к минимуму образование неподвижных воздушных пробок, разрежение должно способствовать устранению зон возможного повышения давления в системе; продолжительность контакта смолы с водным раствором плутония с концентрацией более 1 г/л не выше 24 ч; в качестве наиболее безопасного метода утилизации отработанной смолы сжигать ее. Перед захоронением смола должна быть подготовлена, обработана и переведена в безопасную форму;

– отмечены аварии на предприятиях по переработке ядерного топлива, связанные с упаркой рафинатов и резкстрактов урана, содержащих ТБФ. Произошедшая в 1975 г. на заводе в Саванна-Ривер (США) авария при упаривании раствора уранил-нитрата и переработке его в триоксид урана была вызвана термическим разложением аддукта ТБФ с нитратом уранила («красного масла») и имела тяжелые последствия. Анализ аварии показал, что часть ТБФ, поступившего в выпарной аппарат, входила в состав аддукта  $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2ТБФ$  и при низкой температуре упарки (129 °С) не разложилась, а выделилась в третью фазу («красное масло»).

Термическое разложение началось при 170 °С с выделением газов со скоростью 18 м<sup>3</sup>/с. Быстрое газообразование способствовало выбросу содержимого денитратора, а газы, скопившиеся у потолка, воспламенились, что сопровождалось взрывом и пожаром.

Не менее опасна упарка рафинатов и других жидких отходов, содержащих повышенное количество ТБФ. Основным условием безопасной упарки рафинатов и других жидких отходов, содержащих ТБФ, является предварительная отмывка таких растворов чистым разбавителем.

Другим, наиболее приемлемым, способом служит тщательный отстой рафината в специальных отстойниках. Концентрация ТБФ в упаренном рафинате не должна превышать 3 %, а температуру упарки необходимо ограничить 130 °С.

Радиолиз воды под действием излучения сопровождается выделением водорода со скоростью 1 см<sup>3</sup>/(Вт. ч). Герметичные сосуды могут взрываться просто по причине повышенного давления. Наряду с этим в сосудах, содержащих заметное количество плутония или продуктов



деления (хранилища отходов, силикагелевые и ионообменные колонны, контейнеры с готовой продукцией, содержащей влагу, и др.), где предусматривается отсос водорода или продувка, концентрация водорода в выходящих газах не должна превышать 2 об. %.

В [47] отмечено, что в стратегии предотвращения огнеопасности приемлемым является использование 25 % нижнего предела воспламенения для помещений и водорода и 25 % нижнего предела воспламенения для растворителей и углеводородов (исключение – не более 60 % нижнего порога воспламенения горючих веществ при условии применения шлюзовых камер с автоматической блокировкой дверей); концентрация водорода в любом случае не должна превышать 2 %.

Датчики водорода настроены на подачу сигнала тревоги при превышении концентрации в 10 % нижнего порога воспламенения в воздушной атмосфере (4 %).

Содержание водорода должно быть ниже 1 об. % при нормальной эксплуатации и ниже 50 % нижнего порога воспламенения при отклонениях от нормальной эксплуатации.

## Список литературы

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств / Серия 09. Выпуск 37. – М.: НТЦ ППБ, 2013.
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции. НП-040-02: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 31.12.2002 № 14.
4. ГОСТ Р 22.0.08.96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Взрывы. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2009.
5. Термины и определения по ядерной и радиационной безопасности. Глоссарий. – М.: НТЦ ЯРБ, 2004.
6. Большая советская энциклопедия. Т.4. – М.: СЭ, 1971.
7. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., Кулеш Дж., Стрелов Р. Взрывные явления. Оценка и последствия. Кн. 1. – М.: Мир, 1986.
8. Карауш С. А. Теория горения и взрыва. – М.: Юрайт, 2013.
9. Маршалл В. Основные опасности химических производств. – М.: Мир, 1989.
10. Митрофанов В. В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. – Новосибирск, 2003.
11. Шидловский А. А. Основы пиротехники. – М.: Машиностроение, 1973.
12. Зеленкин В. Г., Боровик С. И., Бабкин М. Ю. Теория горения и взрыва. – Челябинск: ЮУрГУ, 2011.
13. Кукин П. П., Юшин В. В., Емельянов С. Г. Теория горения и взрыва. – М.: Юрайт, 2013.
14. Патри М. Горение и детонация взрывчатых веществ. – М.: Оборонгиз, 1938.
15. Физика взрыва. Т. 1. – М.: Физматгиз, 2002.
16. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Положение об оценке пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств. РБ-060-10: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14.07.2010 № 606.
17. Мельников В. Э. Современная пиротехника. – М.: Типография «Наука», 2014.
18. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. – М.: Мир, 1973.

19. Физическая энциклопедия. – М.: БРЭ, 1999.
20. Комплексное обеспечение безопасности и антитеррористической защищенности зданий и сооружений. Стандарт 26 ЦНИИ, 2005.
21. Свод правил. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. С изменением № 1, утв. и введенным в действие с 01.02.2011 Приказом МЧС России от 09.12.2010 № 643. – Москва, 2009.
22. Справочник химика. – М.: Химия, 1966.
23. Химическая энциклопедия. – М.: СЭ, 1988.
24. Романовский Б. В. Основы химической кинетики. – М.: Экзамен, 2006.
25. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. – М.: Физматлит, 2006.
26. Теория горения и взрыва: учебник и практикум / О. Г. Казаков и др.; под общ. ред. А. В. Тотая, О. Г. Казакова – М.: Юрайт, 2013.
27. Семенов Н. Н. Тепловая теория горения и взрывов // Успехи физических наук. Т. XXIII, вып. 3, 1940.
28. Химический энциклопедический словарь. – М.: СЭ, 1983.
29. Акулов Н. С. Теория цепных процессов. – М. – Л.: ГИТТЛ, 1951.
30. Воеводский В. В. Физика и химия элементарных химических процессов. – М.: Наука, 1969.
31. Баратов А. Н., Корольченко А. Я., Кравчук Г. Н. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. – М.: Химия, 1990.
32. ГОСТ 12.1.044-2018. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Стандартинформ, 2018. 195 с. (Система стандартов безопасности труда).
33. ГОСТ 12.1.044-88. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. – М.: Изж-во стандартов, 1987. 139 с. (Система стандартов безопасности труда).
34. Назин Е. Р., Зачиняев Г. М. Пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств. – М.: НТЦ ЯРБ, 2009.
35. Зельдович Я. М. Избранные труды. Книга 1. Химическая физика и гидродинамика. – М.: Наука, 2014.
36. Новый энциклопедический словарь. – М.: БРЭ, 2002.
37. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации. – М.: Мир, 1985.

38. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ). НП-016-05: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2005 г. № 11. В редакции приказа Ростехнадзора от 28.07.2014 г., № 326.

39. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций. НП-010-98: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 31 декабря 1998 г. № 6. Документ утратил силу с 10 апреля 2016 г. в связи с приказом Ростехнадзора от 08.04.2016 № 141.

40. Коптев П. П., Кубарев А. И., Панфилов Е. А., Кириенко А. П., Ставровский М. Е. Законодательное, нормативное и информационное обеспечение качества продукции, работ и услуг. – М.: Академия проблем качества, 1998.

41. Большая советская энциклопедия. Т. 7 – М.: СЭ, 1972.

42. Большой медицинский словарь. – М.: МЛ, 2000.

43. Атомное сердце России. – ПО МАЯК, 2014.

44. Безопасность ядерного топливного цикла. Информ-Атом, 2002.

45. Об использовании атомной энергии: Федеральный закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ.

46. Гордон Б. Г. Идеология безопасности. – М.: НТЦ ЯРБ, 2006.

47. Экспертиза установки по производству смешанного оксидного (МОКС) топлива Комиссии ядерного регулирования США / Химическая безопасность. Материалы совещания с представителями Госатомнадзора РФ, 2003.

48. Бесчастнов М. В. Взрывобезопасность и противоаварийная защита химико-технологических процессов. – М.: Химия, 1983.

49. О безопасности химических производств: Федеральный Закон о специальном техническом регламенте. – М.: НТЦ ИППБ, 2003

50. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ.

51. Правила перевозок опасных грузов по железным дорогам: утв. Советом по железнодорожному транспорту государств – участников Содружества, протокол от 05.04.1996 № 15.

52. Национальный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 54110 2010. Водородные генераторы на основе технологий переработки топлива. Часть 1. Безопасность. – М., Стандартинформ, 2011.

53. Официальный журнал Европейского Союза. 16 декабря 2008 г. Регламент (ЕС) №1272/2008.

54. Стерлин Я. М. Металлургия урана. – М.: Госатомиздат, 1962.

55. Котельников Р. Б., Башлыков С. Н., Каштанов А. И., Меньшикова Т. С. Высокотемпературное ядерное топливо. – М.: Атомиздат, 1978.
56. Gmelin Handbook of Inorganic Chemistry. Uranium / Springer-Verlag, 1981.
57. Development status of metallic dispersion and non-oxide advanced and alternative fuels for power and research reactors. IAEA, September 2003.
58. Двоглазов К. Н., Богданов А. И., Никонов С. А., Давыдов А. В., Шадрин А. Ю. Исследование взрывопожаробезопасных условий обращения с нитридным топливом. Тезисы VIII Всероссийской конференции по радиохимии «Радиохимия-2015». – Железногорск, 2015.
59. Громов Б. В., Савельева В. И., Шевченко В. Б. Химическая технология облученного ядерного топлива. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
60. Кларк Д. Л., Хеккер З. С., Джарвинен Г. Д., Ней М. П. Плутоний. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2010.
61. Дриц М. Е., Будберг П. Б., Бурханов Г. С., Дриц А. М., Пановко В. М. Свойства элементов. – М.: Металлургия, 1985.
62. DOE Contributors. Plutonium. Nuclear Safety and the Environment. Department of Energy, Office of Health Safety and security. URL: [web.archive.org/web/20090122022256/http://www.hss.energy.gov/nuclearsafety/ns/techstds/standard/hdbk1081/hbk1081d.html#ZZ281](http://web.archive.org/web/20090122022256/http://www.hss.energy.gov/nuclearsafety/ns/techstds/standard/hdbk1081/hbk1081d.html#ZZ281) (дата обращения: 20.06.2023).
63. Emsley J. Plutonium. – Oxford: Oxford University Press, 2003.
64. Кабакчи С. А., Булгакова Г. П. Радиационная химия в ядерном топливном цикле. – М.: РХТУ, 1997.
65. Ellern H. Military and civilian pyrotechnics. – N-Y: Chemical Publishing Company Inc, 1968.
66. Большая Энциклопедия Нефти и Газа. URL: <http://www.ngpedia.ru> (дата обращения: 20.06.2023).
67. Шульц О. В. О критериях воспламенения водорода в составе водородсодержащих парогазовых смесей. – Снежинск, 2013. С. 175.
68. Третьяков Ю. Д., Мартыненко Л. И., Григорьев А. Н., Цивадзе А. Ю. Неорганическая химия. Т. 1. – М.: Академкнига, 2007.
69. Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. – М.: Физматлит, 2008.
70. Розман Б. Ю. О термической стойкости аммиачной селитры. – Л., 1957.
71. Егоров Г. Ф. Радиационная химия экстракционных систем. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
72. Соколов И. П. Физико-химические условия самовоспламенения пирофорных материалов // Ядерная и радиационная безопасность. 2016. № 1 (79).

73. Tomsk-7 Accident Modeling Summary Report. US Department of Energy, 1996.

74. Исследование опасности. Улучшение управления реактивной опасностью. Агентство США по химической безопасности и исследованию опасности. Доклад № 2001-01-Н, 2002.

75. Беркович В. М., Букринский А. М., Мирошниченко М. И., Сидоренко В. А. Комментарий к Общим положениям обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97). – М.: НТЦ ЯРБ, 2004.

76. Конвенция о ядерной безопасности, IAEA, INFCIRC/449, 5 июля 1996 г.

77. Глаголенко Ю. В., Бартенев С. А., Малых Ю. А. и др. Анализ причин разгерметизации сорбционной колонны на установке по получению плутония-238 радиоизотопного завода ПО «Маяк». – М.: ЦНИИАтоминформ, 1996.

78. Бекман И. Н. Ядерная индустрия. – М.: МГУ, 2005.

79. Усачев В. Н., Марков Г. С. Аварии на опытных и промышленных установках, вызванные образованием, накоплением и разложением «красного масла» // Радиохимия, 2003, т. 45, № 1.

80. Рылов М. И., Типонов М. Н. Трагическая хроника атомной эпохи. Часть 1 // PРоAtom, 22.01.2015.

81. Баратов А. Н., Иванов Е. Н., Корольченко А. Я. и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. – М.: Химия, 1987.

82. Розловский А. И. Взрывобезопасность парогазовых систем в технологических процессах: [учебное пособие для химико-технологических специальностей вузов]. – М.: Химия, 1973.

83. О радиационной безопасности населения: Федеральный закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ.

84. О нормативных правовых актах в Российской Федерации: (Проект Федерального Закона). Постановление Государственной думы РФ от 12.05.2004 № 491-IV ГД.

85. О федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии: постановление Правительства Российской Федерации от 06.12.2012 № 1265.

86. Правила подготовки руководств по безопасности при использовании атомной энергии в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору: утв. приказом Ростехнадзора от 25.06.2021 № 228.

87. О принятии технического регламента таможенного союза «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах»: решение Комиссии таможенного союза Евразийского экономического сообщества от 18.10.2011, № 825.

88. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Оценка пожаровзрывоопасности сорбционных систем при

переработке отработавшего ядерного топлива. РБ-125-17: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17.03.2017 № 89.

89. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов с применением пирофорных материалов. РБ-161-19: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.12.2019 № 459.

90. ГОСТ 12.1.010-76. Взрывобезопасность. Общие требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 7 с. (Система стандартов безопасности труда).

91. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2006. 64 с. (Система стандартов безопасности труда).

92. Соколов И. П., Шарафутдинов Р. Б. О системе требований федеральных норм и правил по предотвращению взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла // Ядерная и радиационная безопасность. 2017. № 2 (84). С. 61–69.

93. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-14: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22.08.2014 № 379.

94. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Установки по переработке отработавшего ядерного топлива. Требования безопасности. НП-013-99: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 27.12.1999 № 5.

95. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Пункты сухого хранения отработавшего ядерного топлива. Требования безопасности. НП-035-02: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 28.06.2002 № 7.

96. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Положение о порядке расследования и учета нарушений в работе объектов ядерного топливного цикла. НП-047-11: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.12.2011 № 736.

97. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Размещение установок ядерного топливного цикла. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-050-03: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 31.12.2003 № 11.

98. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к отчету по обоснованию безопасности

ядерных установок ядерного топливного цикла. НП-051-04: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 04.10.2004 № 3.

99. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Размещение пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ. Основные критерии и требования по обеспечению безопасности. НП-060-05: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31.08.2005 № 3.

100. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила ядерной безопасности для объектов ядерного топливного цикла. НП-063-05: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.12.2005 № 15.

101. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к содержанию отчета по обоснованию безопасности при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с плутонийсодержащими материалами на объектах ядерного топливного цикла. НП-065-05: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 07.11.2005 № 5.

102. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к отчету по обоснованию безопасности пунктов хранения ядерных материалов. НП-066-05: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 07.11.2005 № 4.

103. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-069-14: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 06.06.2014 № 249.

104. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов объектов ядерного топливного цикла. НП-070-06: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 05.09.2006 № 3.

105. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Установки по иммобилизации трансурановых радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-076-06: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21.12.2006 № 11.



106. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к содержанию плана мероприятий по защите персонала в случае аварии на предприятии ядерного цикла. НП-077-06: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 27.12.2006 № 12.

107. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Положения о порядке объявления аварийной готовности, аварийной обстановки и оперативной передачи информации в случае радиационно-опасных ситуаций на предприятиях ядерного топливного цикла. НП-078-06: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 27.12.2006 № 15.

108. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2014 № 572.

109. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Требования к обеспечению безопасности при выводе из эксплуатации пунктов хранения радиоактивных отходов. НП-097-16: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 21.07.2016 № 304.

110. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-019-15: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.06.2015 № 242.

111. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-020-15: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.06.2015 № 243.

112. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Требования безопасности. НП-021-15: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.06.2015 № 244.

113. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. НП-058-14: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 05.08.2014 № 347.

114. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Правила безопасности при хранении и транспортировании ядерного топлива на объектах использования атомной энергии. НП-061-05: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30.12.2015 № 23.

115. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-17: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30.11.2017 № 514.

116. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Обеспечение безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Общие положения. НП-091-14: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.05.2014 № 216.

117. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Установки по производству плутоний содержащего ядерного топлива. Требования безопасности. НП-098-17: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.06.2017 № 217.

118. СТО 1.1.1.04.001.1500-2018. Стандарт организации. Правила пожарной безопасности при эксплуатации атомных станций: утв. ОАО «Концерн Росэнергоатом» 13.11.2018.

119. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (НП-001-15): утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17.12.2015 № 522.

120. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Комментарии к федеральным нормам и правилам «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15). РБ-152-18: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.10.2018 № 486.

121. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. – М., ГИИЛ, 1948.

122. Соколов И. П., Понизов А. В. Комплексная оценка мер по предотвращению условий самовоспламенения пирофорных материалов, применяемых и образующихся в технологических процессах ОЯТЦ. – М.: НТЦ ЯРБ, 2016.

123. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987.

## **Сведения об авторах**

Соколов И. П. – доктор химических наук, профессор. Лауреат Премии Правительства Российской Федерации за работу, посвященную обеспечению промышленной и экологической безопасности. Автор более 100 научных публикаций и изобретений в области химической технологии радиоактивных элементов, включая более 10 научных публикаций в области обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла, участник разработки федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и руководств по безопасности при использовании атомной энергии.

Понизов А. В. – кандидат технических наук. Является ведущим специалистом в области использования атомной энергии по направлениям, связанным с обеспечением безопасности объектов ядерного топливного цикла, выводом из эксплуатации (закрытием) ядерно- и радиационно опасных объектов и охраной окружающей среды, а также обращением с радиоактивными отходами. Является автором более 100 научных публикаций по тематике обеспечения безопасности при обращении с радиоактивными отходами. Член Общественного совета Госкорпорации «Росатом» по вопросам взаимодействия с общественностью в части обращения с радиоактивными отходами, отработавшим ядерным топливом, вывода из эксплуатации ядерно- и радиационно опасных объектов и реабилитации их территорий.

Шарафутдинов Р. Б. – кандидат технических наук, заслуженный энергетик Российской Федерации. Является ведущим ученым-практиком в атомной промышленности, специализируется в области разработки научно-методических основ регулирования безопасности объектов использования атомной энергии. Внес существенный вклад в разработку Федеральных законов «О радиационной безопасности населения», «Об использовании атомной энергии», «Об обращении с радиоактивными отходами». Имеет более 100 научных публикаций. Член Российской национальной комиссии по радиологической защите.

## **ТРУДЫ НТЦ ЯРБ**

*И. П. Соколов, А. В. Понизов, Р. Б. Шарафутдинов  
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)*

### **НОРМАТИВНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

Ответственный за выпуск Н. Р. Большакова  
Редактор Т. А. Красотина  
Оригинал-макет подготовлен в ФБУ «НТЦ ЯРБ»

Подписано в печать 30.08.2023

Тираж 150 экз.

Формат 60×84<sup>1/16</sup>

Отпечатано в ФБУ «НТЦ ЯРБ»

Система менеджмента качества  
ФБУ «НТЦ ЯРБ» сертифицирована  
на соответствие требованиям  
международного стандарта  
ISO 9001:2015  
и национального стандарта  
Российской Федерации  
ГОСТ Р ИСО 9001-2015

ISBN 978-5-907011-50-2



9 785907 011502