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

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ПО ЯДЕРНОЙ
И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)**

**ВВЕДЕНИЕ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

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

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

Труды НТЦ ЯРБ

Москва, 2021

УДК 621.039

ББК 31.4

С 59

Соколов И. П., Понизов А. В., Шарафутдинов Р. Б. **Введение в обеспечение взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла / Труды НТЦ ЯРБ. Часть 2. Система нормативного обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла.** – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2021. – 202 с.: ил.

Рецензент: доктор технических наук А. Б. Коростелев

В книге систематизированы сведения по нормативному регулированию взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла, обязательным требованиям по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла, рекомендациям по выполнению обязательных требований по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла, физико-химическому обоснованию обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла.

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

УДК 621.039

ББК 31.4

ISBN 978-5-907011-39-7

© ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2021

Содержание

Список сокращений	6
Введение	7
Глава 1. Понятие взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла	9
1.1. Составная часть ядерной и радиационной безопасности	9
1.2. Принадлежность к пожарной и промышленной безопасности	11
1.3. Содержание понятия взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла	14
Глава 2. Нормативная база обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла	19
2.1. Основы нормативно-правового регулирования безопасности при использовании атомной энергии	19
2.2. Структура нормативной базы обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла	21
Глава 3. Федеральные нормы и правила, содержащие требования по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла	28
3.1. Систематизация федеральных норм и правил в области использования атомной энергии	29
3.2. Категорирование требований	32
3.3. Взаимосвязь общих и специальных требований	34
3.4. Комментарии к общим требованиям по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла	39
3.5. Специфика требований к физическим барьерам объектов ядерного топливного цикла	47
3.6. Основные положения по обеспечению водородной взрывобезопасности	51
Глава 4. Общие требования пожарной безопасности по предотвращению взрывов и пожаров	57
4.1. Понятие горючей среды	58
4.2. Способы исключения условий образования горючей среды	60

4.3. Способы исключения образования в горючей среде (или внесения в нее источников зажигания)	64
4.4. Понятие взрывоопасной и пожаровзрывоопасной сред.....	68
Глава 5. Требования промышленной безопасности к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов	72
5.1. Целеполагающие требования к обеспечению взрывобезо- пасности технологических процессов	72
5.2. Система требований по исключению возможности взрыва	79
5.3. Система требований по предотвращению возникновения взрыва.....	92
5.4. Требования по ликвидации последствий взрыва.....	96
Глава 6. Критические значения параметров взрывоопасных технологических процессов.....	99
6.1. Понятие критических значений параметров	99
6.2. Уровни критических значений параметров.....	104
6.3. Концентрационные пределы.....	120
6.4. Температурные пределы.....	130
6.5. Размерные пределы.....	141
6.6. Энергетические пределы.....	148
6.7. Совокупность критических значений параметров	161
Глава 7. Рекомендации по обеспечению взрывопожаро- безопасности объектов ядерного топливного цикла	168
7.1. Рекомендации по оценке пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств	168
7.1.1. Структура рекомендаций.....	168
7.1.2. Область распространения рекомендаций	169
7.1.3. Рекомендации по отнесению технологических процессов радиохимических производств к пожаровзрывоопасным	169
7.1.4. Рекомендации по использованию показателей пожаро- взрывоопасности веществ и материалов	171
7.1.5. Рекомендации по разработке технических и организационных мероприятий по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств	172
7.1.6. Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов радиохимических производств	173

7.1.7. Рекомендации по составу и содержанию документации, обосновывающей пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств	174
7.2. Рекомендации по оценке пожаровзрывоопасности сорбционных систем при переработке отработавшего ядерного топлива	176
7.2.1. Структура рекомендаций.....	176
7.2.2. Область применения рекомендаций.....	177
7.2.3. Общие рекомендации	178
7.2.4. Рекомендации по этапам оценки взрывопожароопасности сорбционных систем.....	179
7.3. Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности процессов с применением пирофорных материалов на объектах ядерного топливного цикла.....	183
7.3.1. Структура рекомендаций.....	183
7.3.2. Назначение и область применения.....	184
7.3.3. Рекомендации по контролю за фракционным составом и удельной поверхностью пирофорных материалов	185
7.3.4. Рекомендации по обеспечению безопасных условий при обращении с пирофорными материалами	186
7.3.5. Рекомендации, относящиеся к обоснованию безопасных условий при обращении с пирофорными материалами	189
7.4. Практические рекомендации по обеспечению взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла.....	192
Список литературы	194

Список сокращений

АС	– атомная станция
ВКПВ	– верхний концентрационный предел воспламенения
ГО	– герметичное ограждение
НКПВ	– нижний концентрационный предел воспламенения
ОИАЭ	– объекты использования атомной энергии
ООБ	– отчет по обоснованию безопасности
ОЯТЦ	– объекты ядерного топливного цикла
ПАЗ	– противоаварийная защита
ПБЭ	– пределы безопасной эксплуатации
ПВБ	– пожаровзрывобезопасность
ПЗ	– пункты захоронения
ПХ	– пункты хранения
РАО	– радиоактивные отходы
РБ	– руководство по безопасности при использовании атомной энергии
РВ	– радиоактивные вещества
РУ	– реакторная установка
РХП	– радиохимические производства
ТБФ	– трибутилфосфат
ФЗ	– Федеральный закон
ФНП	– федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии
ЯМ	– ядерные материалы
ЯРБ	– ядерная и радиационная безопасность
ЯУ	– ядерная установка

Введение

Опыт эксплуатации ОИАЭ, в том числе ОЯТЦ, показывает, что повышенную радиационную опасность для населения и окружающей среды могут представлять аварийные взрывы.

Проблема предотвращения аварийных взрывов на объектах ядерного топливного цикла является комплексной. Для ее решения используют систему мер, относящихся к обеспечению ядерной и радиационной, промышленной, 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 объектах ядерного топливного цикла.

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» [1] и часть 2 «Система нормативного обеспечения взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла».

В настоящей книге представлена вторая часть, в которой рассмотрены 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 ПВБ технологических процессов.

Кроме того, дополнительно должны выполняться специальные требования к обеспечению ПВБ ОЯТЦ, установленные с учетом специфики 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 пожаро-взрывоопасности 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.

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 [2]:

- *«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 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 вышеприведенного 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 ионизирующего излучения за границы, установленные проектом объекта ЯТЦ, 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 ядерной и радиационной безопасности 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 [3]:

- *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 [4] пожарная безопасность объекта защиты – состояние объекта защиты, характеризующееся возможностью предотвращения возникновения и развития пожара, а также воздействия на людей и имущество опасных факторов пожара.

Отсутствие в [4] 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 [3]). 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 [5] используются термины: «взрывобезопасность» – применительно к производствам и технологическим процессам; «взрывопожаробезопасность технологической системы».

В [6] 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 [7] отмечено, что вся современная техника безопасности основывается на трех принципах предотвращения взрывов газовых систем.

Согласно [7] 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 устанавливают 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 [2]:

- **авария на ОЯТЦ** – нарушение эксплуатации ОЯТЦ, при котором произошел выход ЯМ, РВ и (или) ионизирующего излучения 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 неучитываемыми 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 объекта ЯТЦ 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 вышеизложенного 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 [2] к основным принципам обеспечения взрывобезопасности ОЯТЦ можно отнести следующие:

- *предотвращение возникновения взрыва;*
- *минимизация последствий взрыва, если он произошел.*

Согласно [8] 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 ионизирующего излучения, 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 [2], обеспечиваются за счет последовательной реализации концепции глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения в окружающую среду ионизирующего излучения, ЯМ, РВ, системы технических и организационных мер по защите физических барьеров и сохранению 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 [2]).

Согласно п. 3.9 [2] система технических и организационных мер в общем случае должна образовывать следующие основные уровни глубокоэшелонированной защиты:

- *уровень 1 (Условия размещения объекта ЯТЦ 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 [9] 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 ПВБ 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.

Согласно [10]:

- **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 [11] 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 при использовании атомной энергии.

Согласно [12] РБ содержат рекомендации Ростехнадзора по выполнению требований, введенных в действие Ростехнадзором, ФНП, в том числе:

- *по методам выполнения работ;*

- по методикам;
- по проведению экспертиз 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 безопасности.

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 реакционно способных 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;*
- *государственные стандарты.*

1. Технический регламент таможенного союза «О безопасности оборудования для работы во взрывоопасных средах» [13] 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 [13] приведены требования взрывобезопасности к оборудованию для работы во взрывоопасных средах, а в ст. 5 – обеспечение соответствия требованиям безопасности. В приложении 1 Технического регламента [13] 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» [9];*
- *ФЗ № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [4];*
- *ФЗ № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [14].*

ФЗ [9] определяет правовую основу обеспечения ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасности ОИАЭ (ст. 4, 20, 25, 35), включая обеспечение взрывобезопасности ОЯТЦ.

Объектами применения ФЗ [9] являются ОИАЭ, к которым относятся ОЯТЦ.

В ФЗ [9] приведены обязательные требования, относящиеся к:

- *контролю за обеспечением ядерной, радиационной, технической и пожарной безопасности ЯУ, радиационных источников и пунктов хранения (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» [14] 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 [14] приведены категории опасных производственных объектов (приложение 1 к [14]), 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» [4] 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 [4], должны соблюдаться требования пожарной безопасности, установленные нормативными правовыми актами РФ.

В данном ФЗ [4] 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. 1).*

3. Общие нормативные требования к обеспечению взрывобезопасности объектов приведены в следующих нормативных документах:

- *НП-016-05 «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла» [2];*
- *Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [5].*

Кроме того, нормативные требования к обеспечению взрывобезопасности ОЯТЦ приведены в ряде ФНП, рассмотренных в главе 3.

В НП-016-05 [2] 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 [5] 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» [15], 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 объектах ЯТЦ 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» [17];
- РБ-161-19 «Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов с применением пиррофорных материалов на объектах ядерного топливного цикла» [18].

В РБ-060-10 [16] 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 [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 [18] 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;
- 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 государственных стандартов, относящихся к взрывобезопасности включает:

- ГОСТ 12.1.044-2018 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения» [19];
- ГОСТ 12.1.010-76 «Взрывобезопасность. Общие требования» [20];
- ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования» [21].
- ГОСТ Р 22.0.08.96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Взрывы. Термины и определения [22].

В ГОСТ 12.1.044-2018 [19] 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 [20] приведены:

- *требования к взрыво-предупреждению (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 [21] 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 [22] приведены термины и определения разновидностей взрыва.

Глава 3.

Федеральные нормы и правила, 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 [23]:

- 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 [2, 24–40]. Так как ОЯТЦ являются составной частью ОИАЭ, на них также распространяются общие требования безопасности, установленные в ФНП [41–47] для всех ОИАЭ. Приведенный перечень ФНП использовали для выявления специфики и систематизации требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ.

Согласно закону [9] 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. 1.

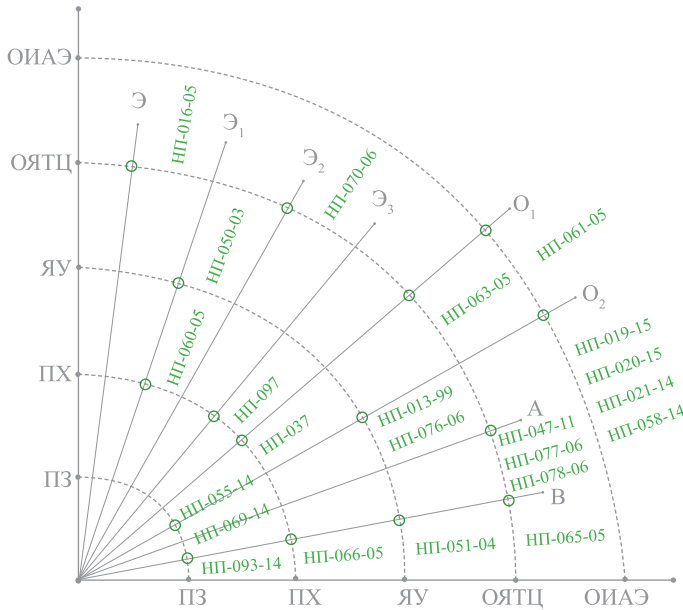


Рис. 1. Распределение ФНП по типам объектов и видам деятельности ОЯТЦ. Э – все виды деятельности ОЯТЦ;
 Э_1 – размещение; Э_2 – эксплуатация (системы и элементы);
 Э_3 – вывод из эксплуатации; O_1 – обращение с ЯМ;
 O_2 – обращение с РАО; А – аварийная готовность;
 Б – обоснование безопасности

На рис. 1 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. 1 диаграмму можно детализировать, если учитывать установленные в нормативных документах разновидности ЯУ, ПХ и ПЗ ОЯТЦ.

Как следует из рис. 1, практически все ФНП в области обеспечения безопасности ОЯТЦ (за единственным исключением [32]) содержат требования по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ.

На основании приведенного на рис. 1 распределения ФНП по типам ОЯТЦ и видам их деятельности можно сделать следующие заключения:

- структура требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ включает три уровня:

1) требования общие для всех типов ОЯТЦ и всех видов деятельности ОЯТЦ, установленные в [2];

2) общие требования для отдельных видов деятельности для всех типов ОЯТЦ, установленные для ОЯТЦ в [27, 31, 32, 35, 37, 38] и для ОИАЭ в [41–45];

3) требования для отдельных типов ОЯТЦ применительно к отдельным видам их деятельности, установленные в [24–30, 33, 36, 39, 40];

- система ФНП в области обеспечения безопасности ОЯТЦ, согласно рис. 2, 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 [2]);*
- *«проектом ПСХ ОЯТ должно быть предусмотрено обеспечение пожаро- и взрывобезопасности в соответствии с требованиями федеральных норм и правил в области использования атомной энергии и других нормативных документов» (п. 4.1.10 [26]).*

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 [2]);*
- *«неблагоприятными для размещения ПХ ЯМ и РВ являются: ... II) 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 [30]).*

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 [2]);
- «Недопустимы для захоронения РАО: способные взрываться, в том числе при нагревании или иницировании ударом или трением» (п. 15 [39]).

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 [2]);
- «проектом должны быть предусмотрены технические и организационные меры по предотвращению воспламенения парогазовоздушных смесей и неконтролируемого разложения смесей органических веществ с окислителями» (п. 3.21 [25]).

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 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» (п. 6.7.7.1 [2]);
- «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 [29]).

На рис. 2 показана принадлежность требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ, установленных в ФНП, к приведенным категориям.

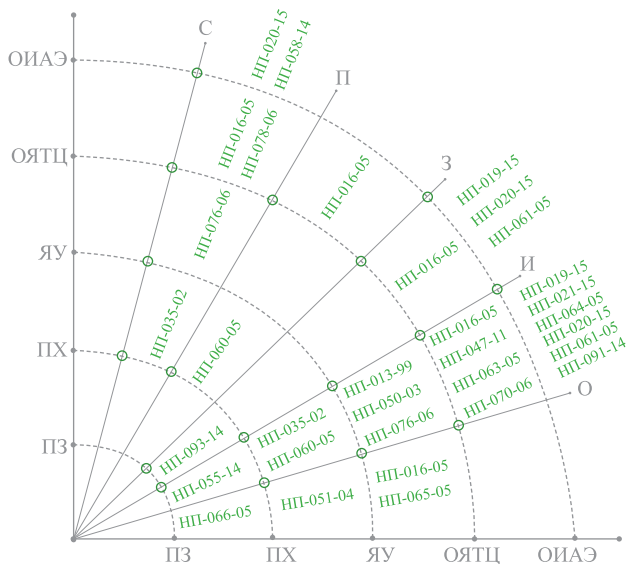


Рис. 2. Распределение ФНП по категориям установленных в них требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ.
Требования: С – соответствия; П – приоритета; З – запрещения;
И – исполнения; О – обоснования

Согласно рис. 2 можно отметить следующее:

- в общих положениях обеспечения безопасности ОЯТЦ [1] используются все перечисленные категории требований по предотвращению взрывоопасности ОЯТЦ;
- требования исполнения используются в наибольшем количестве ФНП и для всех рассмотренных типов ОЯТЦ.

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 [2] 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 [2] 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 [2], 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 [2] 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 [26];*

– *нормативным документам [36].*

Соответственно, в ФНП для ОИАЭ (применимых для ОЯТЦ) требования соответствия относятся к:

– *требованиям пожарной безопасности [41];*

– *требованиям нормативных правовых актов [44].*

Из этого следует, что общие требования соответствия, приведенные в [2], 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 [39];*
- *превышение установленного содержания взрывоопасных веществ РАО [39];*
- *использовать упаковки РАО, подверженные самовозгоранию [39];*
- *объединение газовых потоков, при смешивании которых образуются взрывоопасные смеси [2];*
- *полное обезвоживание высокосолевых водных сред при упаривании жидких РАО [41];*
- *прессование пирофорных и взрывоопасных твердых РАО [42];*
- *прокладка дополнительных кабелей в хранилищах со взрывоопасными веществами [45].*

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 [2], 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 [24, 25, 31, 40–43];*
- *мер по ограничению содержания применяемых и образуемых взрывоопасных веществ [25, 41, 42, 45];*
- *методов и средств контроля за содержанием взрывоопасных веществ [25, 36, 42];*
- *учета, оценки и анализа исходных событий, факторов воздействия взрыва [26–28, 30, 35].*

При этом следует отметить, что часть общих требований исполнения, установленных в [2], 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 [2] и приведенных выше, в их состав входят также следующие требования, установленные в [33] 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 [29, 33], входят в перечень общих требований обоснования, установленных в [2, 33]. Таким образом, общие требования обоснования, установленные для предотвращения взрывоопасности ОЯТЦ, можно отнести к интегральным.

Следует также отметить, что общие требования обоснования, установленные в [2], относятся к структуре оценки и анализа взрывоопасности, а установленные в [33] – 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 [2] в разделе 6.7 «Пожаровзрывоопасность».

В соответствии с п. 6.7.1 [2] 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:

- *исключение возможности образования горючих веществ;*
- *предотвращение возникновения импульсов, иницирующих горение;*
- *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 [2] при выборе в проекте технологических процессов предпочтение должно отдаваться технологиям, исключающим использование взрывоопасных веществ и смесей, а в случае неизбеж-

ности 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 [2] 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 [48], что при оценке безопасности предприятий ядерного топливного цикла 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 [2] в проекте должны быть предусмотрены технические средства и организационные мероприятия по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов объекта ЯТЦ, а также технические средства и организационные мероприятия по снижению радиационного воздействия на работников (персонал), население и окружающую среду в случае взрыва и пожара на объекте ЯТЦ.

Согласно данному требованию предусмотренные проектом технические средства и организационные мероприятия по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов объекта ЯТЦ 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 [2] 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 [48], для каждой отдельной установки должен быть выполнен специальный анализ пожароопасности.

В соответствии с п. 6.7.6 [2] 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 [49] установка соответствующих детекторов и датчиков контроля может снизить риск взрыва огнеопасных веществ.

В соответствии с п. 6.7.7 НП-016-05 [1] меры по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов и по организации тушения пожаров, ликвидации последствий взрывов на объекте ЯТЦ должны быть обоснованы в проекте объекта ЯТЦ 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 [2] 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 [2] 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 [2] 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 [48] 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 [2] для предотвращения пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов объекта ЯТЦ 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 с взрывоопасными смесями и протеканию реакций между ними в режиме взрыва.

В соответствии с международным опытом [48]:

- *взрывчатые смеси могут образоваться вследствие неполного удаления воздуха из холодной печи в начале новой кампании 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 газозводушных смесей, устранению источников воспламенения – могут снизить риск взрыва огнеопасных веществ;*
- *порошкообразный циркалой опасен из-за взрывоопасности его пыли.*

В соответствии с п. 6.7.9 НП-016-05 [2] 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 [2] 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 [2] 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;*
- *предусмотрения проектом ОЯТЦ технических средств, соразмерных взрывоопасности, для предотвращения протекания выявленных неуправляемых химических экзотермических реакций.*

В [48] 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 пара-*

метров является чрезвычайно важным условием для разработки и эксплуатации процесса в пределах безопасного режима.

В соответствии с п. 6.7.12 НП-016-05 [2] дозировка компонентов в технологических процессах должна быть преимущественно автоматической и осуществляться в последовательности, исключаящей 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 [2] принятая в проекте объекта ЯТЦ система физических барьеров должна быть устойчива к возможным взрывам на объекте ЯТЦ, предотвращать распространение ионизирующего излучения, ЯМ, РВ и (или) РАО за предусмотренные в проекте объекта ЯТЦ 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 [49].

О важности установления мер по обеспечению ПВБ данной установки говорит тот факт, что из 30 пунктов раздела «Требования к обес-

печению безопасности, реализуемые при проектировании» – 12 пунктов относятся к обеспечению ПVB.

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 [2]) применительно к данной ядерной установке.

«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 ПVB 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 ионизирующего излучения.

«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 ядерной установке.

«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 пирофорным 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 нерезицилируемых 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 пирофорных 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, исключаяющие 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 [50].

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, исключаяющей 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 дефлаграции 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 локализирующих 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, исключаящими 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 атомной станции, 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 [51] 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, исключающие 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, воспламенения.

В [52] 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 ГО РУ, а также ослабление воздействия горения водородсодержащих смесей на ГО РУ и другие системы и элементы АС, важные для безопасности.

В Комментариях к общим положениям обеспечения безопасности АС [53] 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 локализуемым 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 [1] 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 [4]. Вместе с тем в п. 3 ст. 1 данного ФЗ [4] приведено, что в отношении, в том числе объектов переработки, хранения радиоактивных и взрывчатых веществ, наряду с настоящим ФЗ [4], должны соблюдаться требования пожарной безопасности, установленные нормативными правовыми актами РФ.

В п. 2 статьи 48 [4] 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 [4] как *«среда, способная воспламениться 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 ее 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 воспламеняться при воздействии источника зажигания.

В [4] отсутствует определение негорючей среды, но в ст. 12 приведены следующие группы подразделяющихся по горючести веществ и материалов:

- *«негорючие – вещества и материалы, неспособные 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 неспособна 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 воспламениться 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 воспламениться 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 [4] приведено, что *«исключение условий образования горючей среды должно обеспечиваться одним или несколькими из следующих способов»*, которые, с учетом их нумерации в [4], приведены в табл. 1.

Таблица 1

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)
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. 1 обязательные для исполнения требования можно разделить на две группы (рис. 3):

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 способа исключения образования горючей среды целесообразно осуществлять в совокупности с другими из приведенных в таблице 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. 3. Схема взаимосвязи требований по исключению условий образования горючей среды при использовании горючих веществ и материалов

4.3. Способы исключения условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания

В статье 50 [4] приведено, что «*исключение условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания должно достигаться одним или несколькими из следующих способов*», которые, с учетом их нумерации в [4], приведены в табл. 2.

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 2

Перечень способов исключения условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания

№ п/п	Способ
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

№ п/п	Способ
8	Ликвидация условий для теплового, химического и (или) микробиологического самовозгорания обращающихся веществ, материалов и изделий
9	Исключение контакта с воздухом пирофорных веществ
10	Применение устройств, исключающих возможность распространения пламени из одного объема в смежный

Условно приведенные в табл. 2 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. 4).

ИСКЛЮЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ТЕПЛОВОГО 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. 4. Схема взаимосвязи требований по исключению образования в горючей среде источников зажигания горючих веществ и материалов, пирофорных материалов

В соответствии с таким делением к первому типу следует отнести способы, исключают 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. 2):

- *поддержание безопасной температуры нагретых веществ, материалов и поверхностей, которые контактируют с горючей средой (требование 5 табл. 2), 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 табл. 2);*
- *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) самовозгорания обращающихся веществ, материалов и изделий (требование 8 табл. 2);*
- *применение устройств, исключающих воздействия на горючую среду теплового потока от пламени, распространяющегося из одного объема в следующий при возникновении пожара (требование 10 табл. 2).*

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 концен-

трации окислителя в горючей среде в защищаемом объеме (требование 6 табл. 2), 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, исключающие 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. 2);*
- *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. 2);*
- *применение устройств для ограничения энергии искрового разряда в горючей среде до безопасных значений (требование 6 табл. 2);*
- *применение искробезопасного инструмента при работе с легковоспламеняющимися жидкостями и горючими газами (требование 7 табл. 2) 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. 2);*
- *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) (требования 3 табл. 2).

Выполняя перечисленные требования, необходимо учитывать, что горючие вещества и материалы, обращающиеся на ОЯТЦ, всегда содержат источник зажигания в виде источников ионизирующего излучения. Поэтому большое значение для ОЯТЦ приобретает оценка энергетического воздействия ионизирующего излучения 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 [4] приведено, что *«технологические среды по пожаровзрывоопасности подразделяются на следующие группы:*

- 1) пожароопасные;*
- 2) пожаровзрывоопасные;*
- 3) взрывоопасные;*
- 4) пожаробезопасные».*

В статье 14 [4] сообщается, что *«классификация технологических сред по пожаровзрывоопасности и пожарной опасности используется для установления безопасных параметров ведения технологического процесса».*

Определения различных технологических сред, приведенные в [4], представлены в табл. 3.

Анализ приведенных в табл. 3 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 [4] не приведено определение термина «пожар».

Действительно, если пожаробезопасная среда относится в соответствии с п. 1 статьи 16 [4] 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 3

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

№ п/п	Определение
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
5	К пожаробезопасным средам относится пространство, в котором отсутствуют горючая 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;*
- *для пожаровзрывоопасной и для взрывоопасных сред взрыв инициируется источником зажигания.*

Тем не менее из рассмотрения приведенных в табл. 3 определений можно заключить, что:

- *не любая горючая 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 [5]. 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 [5]. 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 [5] 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. 5).

Так, в определении аварии на объекте ядерного топливного цикла приведено [2], 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.

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.



Рис. 5. Общая структура целеполагающих требований к обеспечению взрывобезопасности технологических процессов

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 [5].

Согласно п. 3.1 [5]: «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 [5] терминов, обозначающих объекты (техническая система, технический блок и др.), содержащие аппараты, в которых осуществляют технологические процессы, приведены в табл. 4 [5].

В приведенных требованиях п. 3.1 [5] 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 4

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 значения параметров материальных сред, целенаправленно проводимых в аппарате (системе взаимосвязанных аппаратов, агрегате, машине и т. д.)
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 [5] необходимо исключить возможность возникновения взрыва в производственном объеме при аварийной разгерметизации технологического оборудования.

В Общих положениях обеспечения безопасности ОЯТЦ требования п. 3.1 [2] 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 [2].

Кроме того, в п. 3.2 [5] 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, определяющих взрывоопасность процесса, допустимый диапазон их изменений, организация проведения процесса (аппаратурное оформление и конструкция технологических аппаратов, фазовое состояние обрабатываемых 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 [5], взаимосвязана с реализацией значений технологических параметров при осуществлении технологического процесса.

Так, в п. 3.3 [5] 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 [5] приведены требования о необходимости предусмотрения 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 [5] 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, и превышение которых приводит к взрыву по завершению периода индукции.

Для оповещения о приближении к регламентируемым значениям, согласно [5], должны быть установлены предупредительные значения технологических параметров, а к регламентируемым предельно допустимым значениям – опасные значения параметров.

Определения перечисленных типов значений технологических параметров, приведенных в [5], представлены в табл. 5.

Таблица 5

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 регламентируемого 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

№ п/п	Термин	Определение
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 выброса рабочих сред в атмосферу

Здесь имеет место четкая аналогия с терминами, используемыми в Общих положениях обеспечения безопасности ОЯТЦ [2].

Так, в [2] регламентируемые значения параметров соответствуют эксплуатационным пределам, а регламентируемые предельно допустимые значения параметров – пределам безопасной эксплуатации.

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 [53].

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 [5] приведены условия взрывопожаробезопасного проведения отдельного технологического процесса или его стадий. Формулировки этих условий представлены в табл. 6 [5].

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. 6 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. 6.

Таблица 6

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 подбором 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 исключающем образование взрывоопасной смеси

№ п/п	Условия обеспечиваются
6	Выбором значений параметров состояния технологической среды (состава, давления, температуры), снижающих ее взрывопожароопасность
7	Надежным энергообеспечением



Рис. 6. Схема направлений создания условий для исключения возникновения взрыва в технологическом процессе

Изображенная на рис. 6 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 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 [4] 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. 6 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. 6 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 [5].

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 [5].

В п. 3.14 [5] 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 [5].

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 [4] 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 [5]: *«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. 6.

12. Использование взрывобезопасного оборудования для осуществления технологического процесса по принятому способу.

Требование о необходимости рационального выбора геометрических параметров аппаратов представлено в табл. 6.

Сюда также целесообразно поместить требования, приведенные в пп. 4.66, 5.1.5, 5.3.2 [5]:

– *«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. 6.

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. 6.

В п. 3.7 [5] 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 [5] 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 [5]:

- *«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. 6.

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. 6.

В п. 3.13 [5] 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 инициирования 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. 6.

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. 6.

В п. 3.4 [5] приведено, что *«способы и средства, исключаящие 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 [5]) показаны на рис. 7.

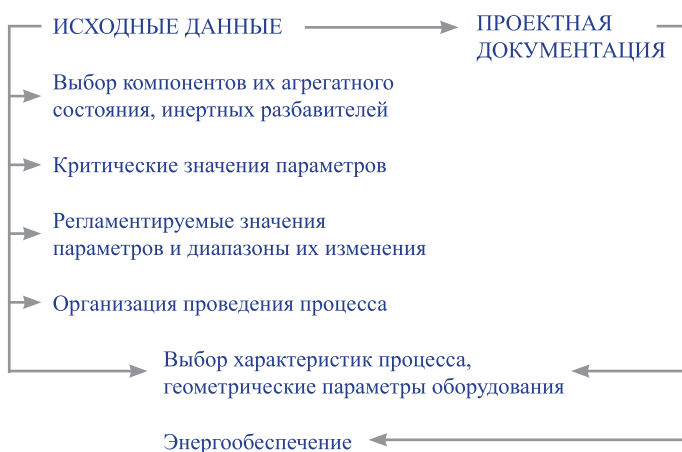


Рис. 7. Схема взаимосвязи требуемых данных, представляемых в исходных данных и проекте

Как следует из рис. 7, 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 [5] приведены требования по обеспечению оптимальных условий взрывопожаробезопасности для технологической системы, которые представлены в табл. 7 [4].

Таблица 7

Обеспечение оптимальных условий взрывопожаробезопасности технологической системы

№ п/п	Оптимальные условия обеспечиваются
1	Рациональным подбором технологической системы с минимально возможными относительными энергетическими потенциалами входящих в нее технологических блоков
2	Разделением отдельных технологических операций на ряд процессов или стадий (смешение 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

Они представляют собой организационные меры по обеспечению взрывобезопасности всей технологической системы и их целесообразно рассматривать совместно с п. 3.5 [5], в котором приведены необходимые меры, направленные на обеспечение взрывобезопасности при подключе-

нии 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 [5]) относительный энергетический потенциал (Q), то этот принцип можно представить в виде:

$$\sum Q_i = Q_{min}, \quad (1)$$

где $I = 1, 2, \dots, N$ – число аппаратов (технологических блоков) в технологической системе.

Так как, согласно Приложению № 2 [5], относительный энергетический потенциал функционально связан с приведенной массой парогазовой среды (m), то принцип минимизации можно также представить в виде:

$$\sum m_i = m_{min}. \quad (2)$$

На рис. 8 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 [5], 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. 8, $m < 98$ кг).

Методика расчета относительного энергетического потенциала и приведенной массы парогазовой смеси приведена в Приложении 2 [5].

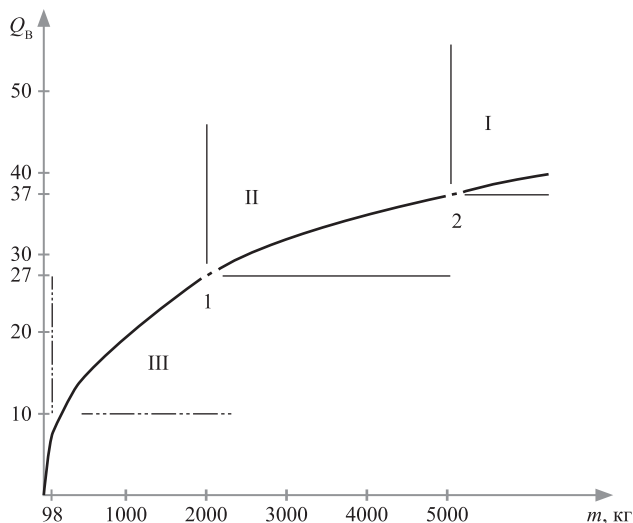


Рис. 8. Показатели категорий взрывоопасности технологических блоков

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 6 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 невышшения 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 $1\ 000\ \text{кг} (< 2\ 000\ \text{кг})$. 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. 7 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. 7 для этого должны быть предусмотрены соответствующие меры.

5.3. Система требований по предотвращению возникновения взрыва

Требования, изложенные в [5] 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 [5]:

- *«технологические процессы не должны проводиться в пределах достижения критических значений параметров»;*
- *«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»;*
- *«выбор методов и средств, исключающих 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 $Q \leq 10$ 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 [5]:

«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 противо-аварийной 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 $Q \leq 10$, 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 [5]:

- *«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 $Q \leq 10$ 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 минимизации последствий взрыва

Требования, изложенные в [5] по минимизации последствий взрыва в технологическом оборудовании, можно подразделить на три группы.

К первой группе относятся требования по защите технологического оборудования от разрушений в результате взрыва.

Ко второй группе относятся требования по минимизации объема выбросов продуктов из технологического оборудования.

К третьей группе относятся требования 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 [5]:

– *«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 быстродействующими 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 с 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 и 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 [5]:

– *«для каждого технологического блока с учетом его энергетического потенциала проектной организацией разрабатываются меры и предусматриваются средства, направленные на предупреждение*

выбросов горючих веществ 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 с;

для технологических блоков II и III категорий взрывоопасности – установка запорных и (или) отсекающих устройств с дистанционным управлением и временем срабатывания не более 120 с;

для блоков с относительным значением энергетического потенциала $Q \leq 10$ – 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 с.

При этом должны быть обеспечены условия безопасного отсеечения 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 [5] (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 [5] при разработке мероприятий по предотвращению взрывов и пожаров в объеме зданий и сооружений должны учитываться нормы ФЗ [4], то для исключения возможности возникновения повторного взрыва необходимо использовать способы исключения образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания, приведенные в [4].

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 среда находится;*
- *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, ненарушение критических значений которых обеспечивает его взрывобезопасность.

Так, согласно п. 3.2 [5]: *«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 [5] приведено, что *«для каждого технологического процесса определяется совокупность критических значений параметров».*

В п. 3.17 изложено требование, по которому *«мероприятия по предотвращению взрывов и пожаров в оборудовании разрабатываются с учетом показателей пожаровзрывоопасности обращающихся веществ при регламентируемых 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 ионизирующее излучение, 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 [54] 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 [19] 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 иницирования 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 объектах ядерного топливного цикла 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 случае – 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 [54] 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 [54] 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 [54] 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 [55] 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 [54] 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 [54] 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 [54], 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 $H_2 - Cl_2$, $H_2 - O_2$ с добавками Cl_2 в результате неоднородного распределения концентрации свободных радикалов при ультрафиолетовом облучении смеси).

В [54] 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 [56] 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:

$$\delta = (Q/\lambda) (E/RT_0) r^2 W, \quad (3)$$

где:

Q – тепловой эффект реакции;

E – энергия активации;

R – универсальная газовая постоянная;

λ – 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 δ достигает указанных критических значений, то воспламенение имеет тепловую природу; если воспламенение происходит при значениях δ 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 δ ;

– 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:

$$\Delta P = (1/\Delta V) (\Delta n) R (\Delta T). \quad (4)$$

Так, в [54] 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 (ΔP) в ходе самовоспламенения и горения пожаро-взрывоопасной смеси может быть обусловлен:

- резким изменением количества газообразных компонентов (Δn) 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 (ΔT) реакционной смеси в ходе протекания реакции при небольшом изменении количества газо-

образных компонентов и при постоянном объеме смеси, что может соответствовать развитию процесса в ходе теплового воспламенения и начальной стадии теплового взрыва;

– совместным резким изменением температуры (ΔT) и количества газообразных компонентов (Δn) при постоянном объеме смеси, что может соответствовать развитию процесса в ходе тепло-цепного воспламенения, приводящего к тепловому взрыву;

– резким изменением объема смеси (ΔV) при небольших изменениях (Δn) и (ΔT) 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 [5] приведено, что критические значения, в том числе, включают область взрываемости.

В общем виде характер взаимного расположения границ критических значений технологических параметров показан на рис. 9 и 10.

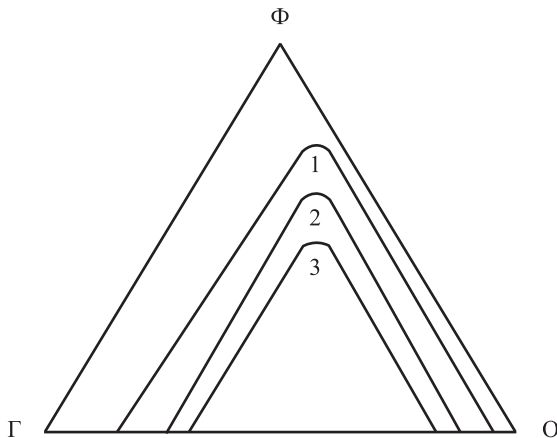


Рис. 9. Взаимное расположение областей самовоспламенения (1), взрываемости (2) детонации (3) в системе горючее (Г) – окислитель (О) – флегматизатор (Ф) на концентрационной диаграмме

В качестве примера на рис. 9 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 (4), в которой исключены условия возникновения самопроизвольного горения и взрыва технологической данной среды.

Концентрационная диаграмма на рис. 9 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. 9 характер взаимного расположения областей самовоспламенения, взрываемости и детонации на концентрационной диаграмме соответствует известным данным для системы водород – воздух – вода (диаграмма Шапиро-Моффети [58]).

Аналогичный тип концентрационных диаграмм для области детонации отмечен в работе [58] применительно к экстракционным и сорбционными системам:

- *экстрагент ТБФ – азотная кислота – вода;*
- *анионит ВП-1АП в нитратной форме – азотная кислота – вода;*
- *катионит КУ-2 – азотная кислота – вода.*

На рис. 10 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 [59] применительно к трем пределам взрываемости в системах водород – кислород и водород – сера.

Как следует из рис. 10, границы областей самовоспламенения, взрываемости и детонации в первом приближении представляют собой одноподобные 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. 10 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.

Эволюция типов пределов взрываемости по мере увеличения взрывопожароопасности веществ и материалов показана на рис. 11 на примере концентрационных диаграмм.

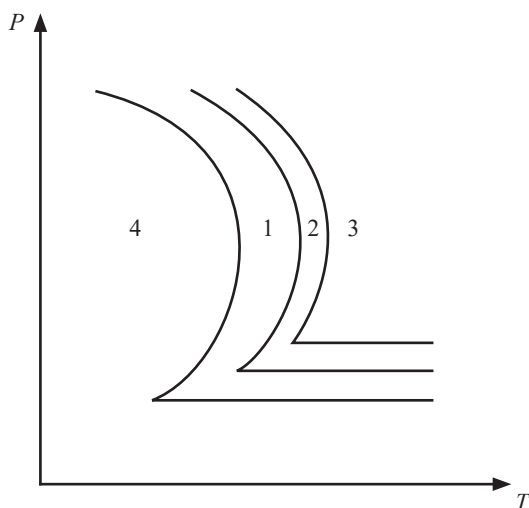


Рис. 10. Взаимное расположение областей самовоспламенения (1), взрываемости (2), детонации (3) и взрывобезопасной области (4) на диаграмме трех пределов для газовых систем

На первом типе диаграмм на рис. 11 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.

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.

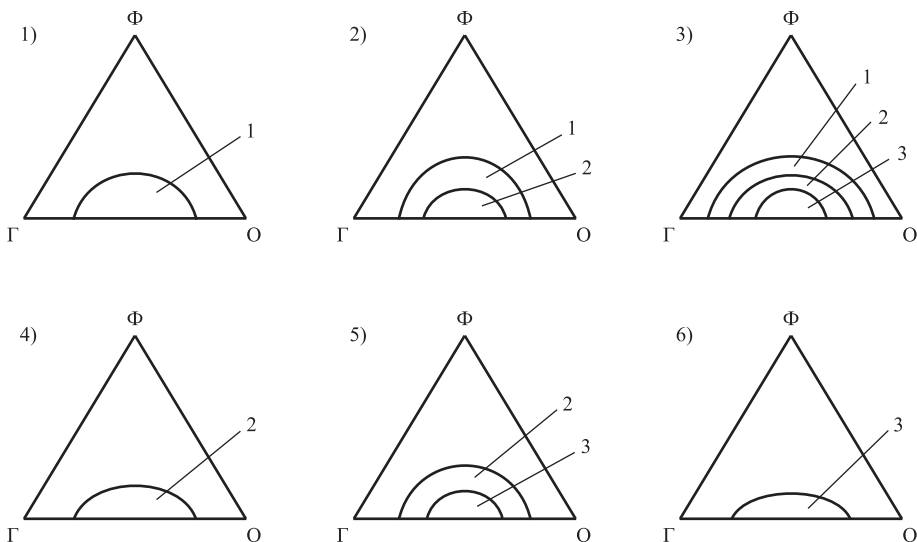


Рис. 11. Типы концентрационных диаграмм в системах:

1) горючее (Г) – окислитель (О) – флегматизатор (Ф);

2) взрывчатое вещество (В) – флегматизатор (Ф)

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 самовоспламенение, 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. 12 на примере концентрационной диаграммы.

Согласно рис. 12 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. 12). При переходе из точки 1 в точку 3, то есть при увеличении содержания окислителя, период индукции снизится до значения τ_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 вышеизложенного 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.

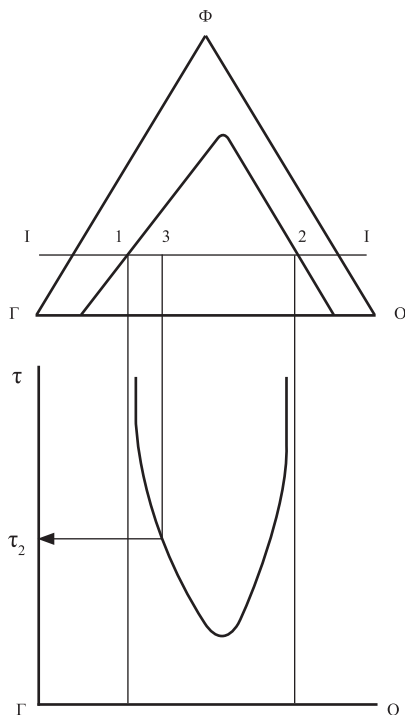


Рис. 12. Взаимосвязь между критическими значениями параметров пожаровзрывоопасности и периодом индукции взрывчатого превращения

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 [4, 19], относятся:

- НКПВ и ВКПВ;
- минимальное взрывоопасное содержание кислорода;
- минимальная флегматизирующая концентрация флегматизатора.

Определения этих показателей пожаровзрывоопасности, данные в [19], приведены в табл. 8.

Таблица 8

Определения концентрационных показателей пожаровзрывоопасности веществ и материалов

№ п/п	Определение
1	Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени – минимальное (максимальное) содержание горючего в смеси «горючее вещество – окислительная среда», при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания
2	Минимальным взрывоопасным содержанием кислорода называется такая его концентрация в горючей смеси, ниже которой воспламенение и горение смеси становится невозможным при любой концентрации горючего в смеси, разбавленной данным флегматизатором

№ п/п	Определение
3	Минимальная флегматизирующая концентрация – наименьшая концентрация флегматизатора в смеси с горючим и окислительной средой, при которой смесь становится неспособной к распространению пламени при любом соотношении горючего и окислительной среды

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 [54, 56] 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 [54] 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 [55] рисунку) 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 [56] 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 [54].

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. 12, на котором изображено взаимное расположение НКПВ и ВКПВ, и минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора.

Как видно из рис. 12 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. 13.

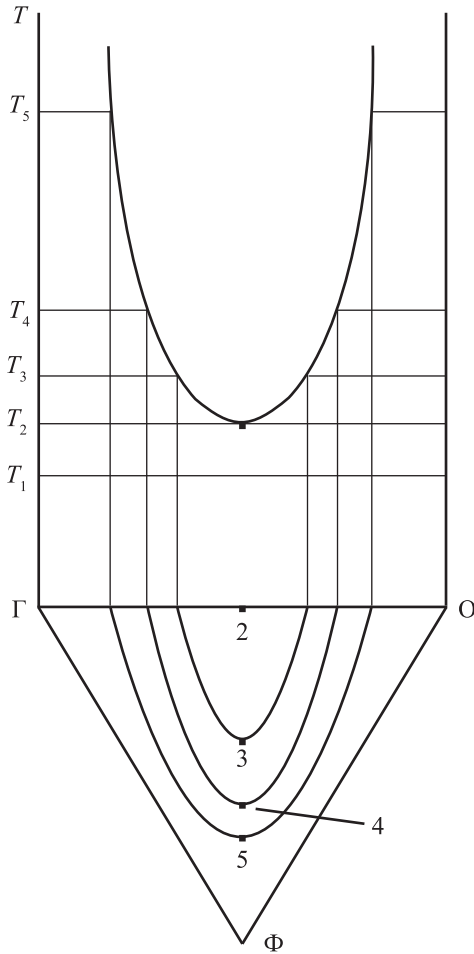


Рис. 13. Влияние температуры на изменение концентрационных границ области самовоспламенения

Как видно из рис. 13, 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. 13 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. 14 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.

- температура вспышки;
- температура воспламенения;
- температура самовоспламенения;
- температурные пределы распространения пламени.

Определения этих показателей пожаровзрывоопасности, данные в [19], приведены в табл. 9.

В отношении определения температуры самонагрева можно заключить, что:

- данный показатель пожаровзрывоопасности может относиться к любому веществу, способному самонагреваться за счет протекания химических реакций с его участием;
- выше температуры самонагрева данного вещества самопроизвольный процесс его нагревания 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 9

Температурные показатели пожаровзрывоопасности веществ и материалов

№ п/п	Определение
1	<p>Температура вспышки – самая низкая температура горячего вещества, при которой в условиях специальных испытаний над его поверхностью образуются пары или газы, способные вспыхивать от источника зажигания, но скорость их образования еще не достаточна для устойчивого горения.</p> <p>Вспышка – быстрое сгорание горячей смеси, не сопровождающееся образованием сжатых газов</p>

№ п/п	Определение
2	Температура воспламенения – наименьшая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний вещество выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что после их зажигания возникает устойчивое пламенное горение
3	Температура самовоспламенения – самая низкая температура вещества, при которой в условиях специальных испытаний происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, заканчивающихся пламенным горением
4	Температурные пределы распространения пламени – такие температуры вещества, при которых его насыщенные пары образуют в конкретной окислительной среде концентрации, равные, соответственно, нижнему (нижний температурный предел) и верхнему (верхний температурный предел) концентрационным пределам распространения пламени
5	Температурой самонагрева называется самая низкая температура вещества, при которой самопроизвольный процесс его нагревания не приводит к тлению или пламенному горению

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 развиваться 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; соответст-

венно, 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 ионизирующего излучения от других технологических сред ОЯТЦ.

В первом случае повышение интенсивности самопроизвольного нагрева пожаровзрывоопасной среды включает последовательное проте-

кание 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. 15.

Как следует из рис. 15, значения температурных пределов распространения пламени, соответствующие концентрационным пределам, находятся на кривой зависимости температуры паров горючих веществ от их состава в смеси с окислительной средой.

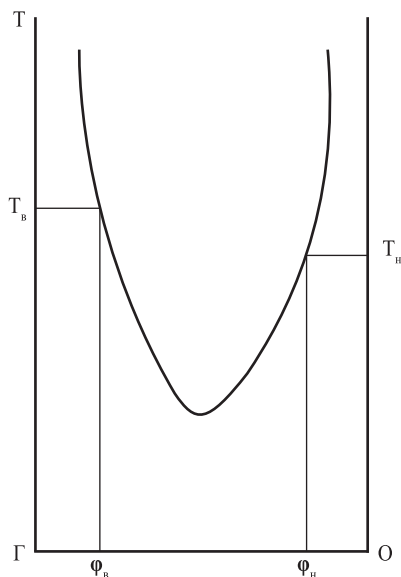


Рис. 15. Взаимосвязь между температурными и концентрационными пределами распространения пламени

Характер зависимости температуры самовоспламенения газовой пожаровзрывоопасной смеси от давления показан ранее на рис. 10.

При этом следует учитывать, что давление газовой системы равно сумме парциальных давлений ее компонентов, которые пропорциональны их объемным концентрациям.

В работе [54] 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. 16 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.

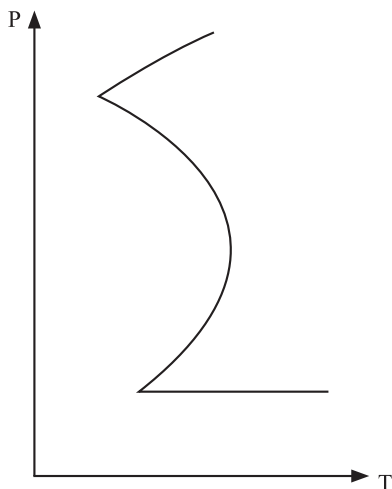


Рис. 16. Обобщенный вид диаграммы пределов самовоспламенения пожаровзрывоопасной газовой среды

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 радиолитического распада воды и органических соединений, следует учитывать следующие факторы, влияющие на значения температурных пределов, которые изложены в [56]:

- 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. 17 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 газовой выделением, 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).

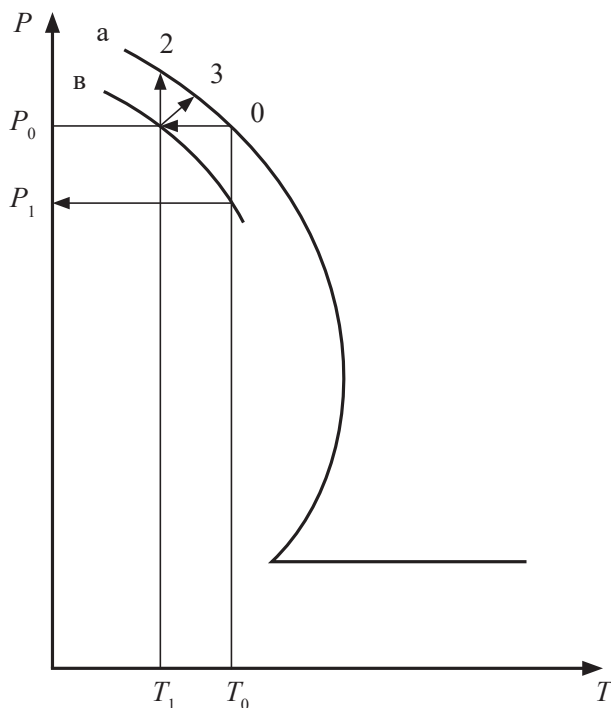


Рис. 17. Условия соответствия значения температурного предела безопасным значениям

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 [56] 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 [59] 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 [54] 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. 10. Применительно к этому случаю кривые 1, 2, 3 на рис. 10 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 [60].

Как следует из рис. 10:

- 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 перепадам 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 пожаро-взрывоопасной смеси.

Ниже приведены краткие сведения о влиянии диаметра сосуда на предотвращение детонации находящейся в нем взрывоопасной технологической среды.

Согласно [54] 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 [7] «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 ослабеваает, 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 [60].

Особенности влияния размера частиц на детонацию в гетерогенных системах приведена в [55]:

- 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 малолетучих 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. 18 (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 [61].

Как следует из рис. 18, 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).

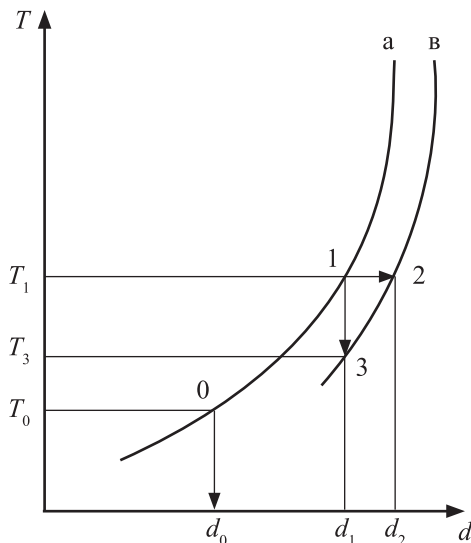


Рис. 18. Зависимость температуры самовоспламенения дисперсного материала от размера его частиц

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 [19] 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 [62] 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. 19.

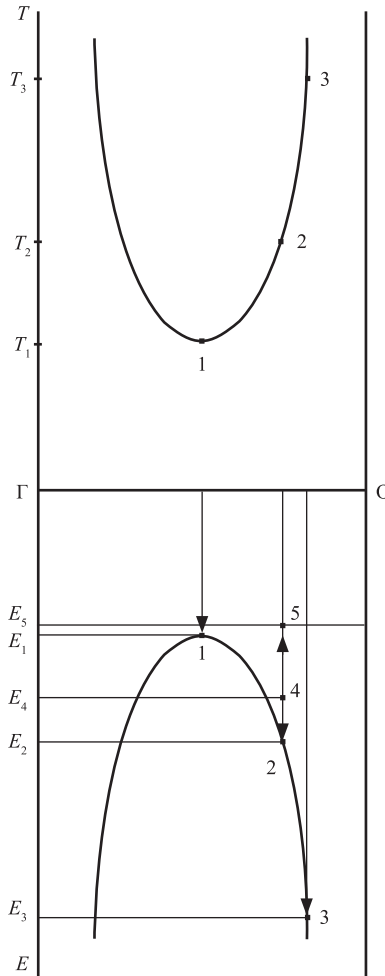


Рис. 19. Взаимосвязь между концентрационными пределами и энергией источника зажигания

На верхнем графике рис. 19 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 [64] и для воспламенения ряда углеводородо-воздушных смесей при давлении 230 мм.рт.ст. [63].

В [54] 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. 19).

Для меньших значений концентрации горючего компонента в смеси с окислителем (точки 2 и 3 на рис. 19) 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. 19, 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. 19, 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 можно привести значения минимальной энергии зажигания на воздухе, полученные стандартным методом и приведенные в справочнике [3], для некоторых веществ, представляющих интерес при обеспечении ПVB 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 зажигание снизу и зажигание сверху, при которых создаются разные условия для воспламенения и, следовательно, для которых получают различные значения энергетических пределов.

Приведенные в [56] особенности нижнего и верхнего зажигания газообразных систем рассмотрены 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;*
- *ионизирующее излучение;*
- *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 [19].

В [7] 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 миллиджоуль у быстрогорящих газовых сред до сотен джоулей у наиболее медленногорящих, то есть на 8–9 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 [56]:

- 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; зажигающая 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 [7]:

– *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 [7]:

– *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 [64] 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 проволоочки 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 проволоочки 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 проволоочки 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 [64] также приведены следующие данные по определению нагрева поверхности платиновой проволоочки 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 проволоочки за счет теплового эффекта реакции окисления водорода повышается с 50 до 1 100 °С, причем имеет место практически линейная зависимость между температурой поверхности платиновой проволоочки и содержанием водорода в смеси с воздухом. Например, при содержании водорода 2 % об. температура платиновой проволоочки достигает 350 °С, при содержании воздуха 4 % об. – 750 °С.

В [54] 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 [59]. 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 [54] сообщается о:

- увеличении энергии, необходимой для зажигания искрой бедных по водороду смесей с воздухом, разбавленных большим количеством углекислого газа, если смесь турбулизована;*
- 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 [55] отмечены два способа детонации взрывоопасной смеси источником зажигания и приведены следующие значения энергии, необходимой для инициирования детонации:

- не прямое инициирование в результате «мягкого» зажигания, ускорения пламени и перехода горения в детонацию;*
- прямое инициирование внешним источником энергии (высоковольтной электрической искрой, дугой в геометрии с жесткими границами, мощным взрывом);*

– значения энергии прямого инициирования детонации в водородо-воздушных смесях со стехиометрическим коэффициентом от 0,75 до 1,5 составляют от 10 до 1 000 кДж.

В [65] 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 стандартизированной.

В [7] 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 [65] 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 [5] 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 [58] 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. 20 представлены взаимосвязанные между собой общими осями координат: давление (P) – температура (T) – состав бинарной системы (горючее вещество – окислитель) (φ) – 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: φ_0 , φ_1 и φ_2 .

При этом состав реакционной системы, соответствующий значению φ_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 φ_1 и φ_2 , относятся к последовательному увеличению избытка одного из компонентов по сравнению с оптимальным соотношением реагентов φ_0 .

Для определенности пусть значения φ 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 φ_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 линии 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. 20 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. 20, соответствуют одинаковым значениям каждого набора из трех варьируемых параметров: 1 – φ_0, T_1, P_3 ; 2 – φ_1, T_2, P_3 и т. д.

В соответствии с нижним графиком на рис. 20:

- 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 б) являются предельными значениями; ниже этих значений температур для данных значений давления – самовоспламенение газовой смеси и ее тепловой взрыв – становятся не возможными событиями;
- увеличение температуры способно существенно снизить НКПВ (повысить ВКПВ) газовой смеси (φ_0 при T_1 ; $\varphi_1 < \varphi_0$ при T_2 ; $\varphi_2 < \varphi_1$ при T_3) при относительно низких температурах, близких к предельным температурам.

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. 20.

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 б) являются предельными значениями, ниже этих давлений при данных

температурах – самовоспламенение газовой смеси и ее тепловой взрыв становятся не возможными событиями;

– увеличение давления способно существенно снизить НКПВ (повысить ВКПВ) газовой смеси (φ_0 при P_1 ; $\varphi_1 < \varphi_0$ при P_2 ; $\varphi_2 < \varphi_1$ при P_3) при относительно низких давлениях, близких к их предельным значениям.

Таким образом, можно прийти к заключению, что в общем случае (если значения других параметров гарантировано не могут попадать в область самовоспламенения) совокупность критических значений параметров не следует ограничивать критическим значением одного технологического параметра.

Изложенный применительно к P - T - φ 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. 21 показаны аналогичные взаимосвязанные функциональные зависимости для пылегазовых смесей и пирофорных материалов между размером частиц d температурой T и соотношением горючее вещество: окислитель φ .

Согласно верхнему правому графику на рис. 21:

– 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.

В соответствии с нижним правым графиком на рис. 21:

- 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 φ_0 (точка 1); $d_4 < d_6$ при φ_1 (точка 2); $d_1 < d_4$ при φ_2 (точка 3).

На левом верхнем графике рис. 21 показано, что:

- для каждого размера частиц существует предельное значение температуры, ниже которого самовоспламенение и тепловой взрыв реакционной системы становится не возможным 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 - φ и d - T - φ в одну диаграмму P - T - φ - d и ее дополнение диаграммами, включающими другие рассмотренные в данном разделе технологическими параметрами, влияющими на самовоспламенение (взрываемость) технологической среды.

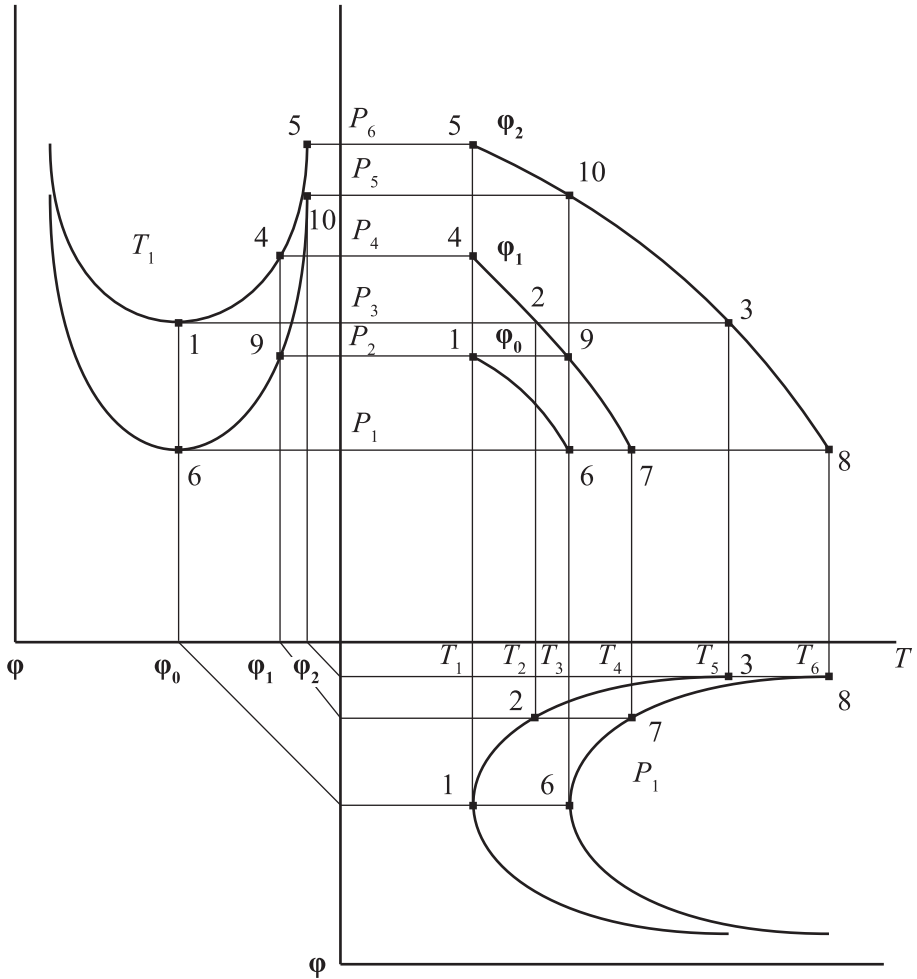


Рис. 20. Взаимосвязь между концентрационными и температурными пределами самовоспламенения взрывоопасных газовых смесей

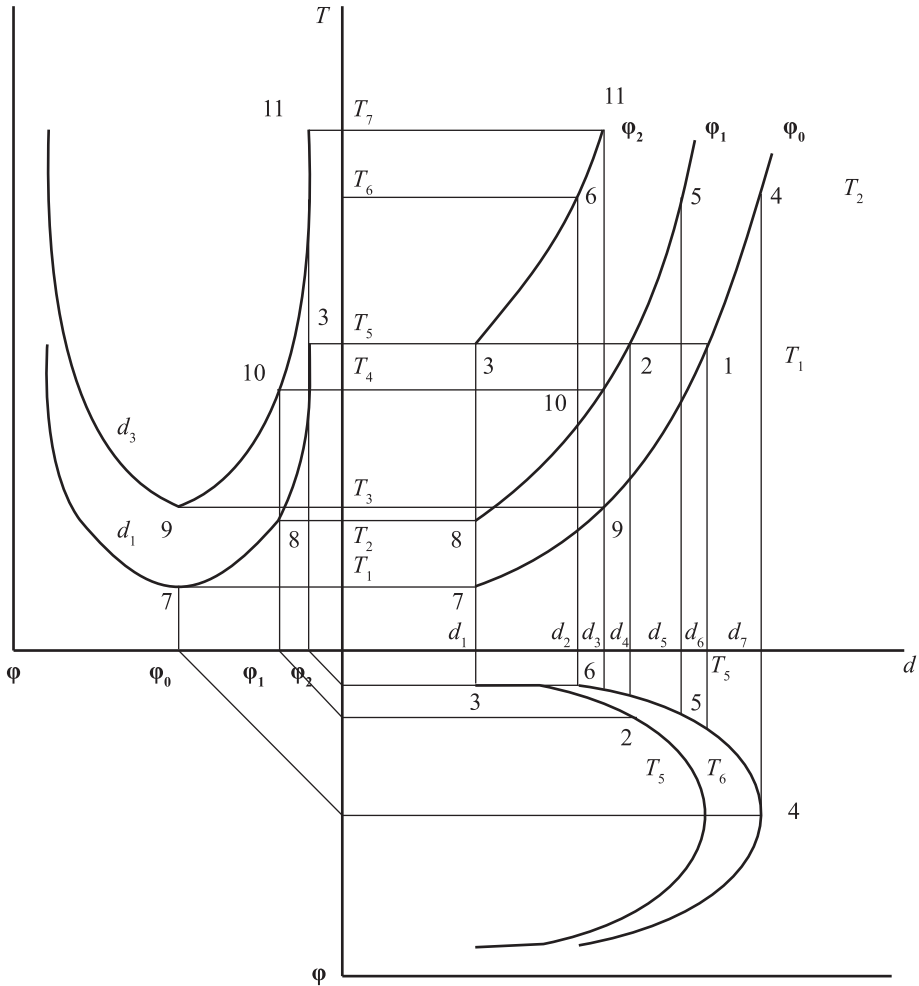


Рис. 21. Взаимосвязь между концентрационными и температурными пределами самовоспламенения и дисперсным составом взрывоопасной пылевой смеси (пирофорным материалом)

Глава 7.

Рекомендации по обеспечению взрывопожаробезопасности объектов ядерного топливного цикла

7.1. Рекомендации по оценке пожаровзрывобезопасности 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:

I. Общие положения;

II. Потенциально пожаровзрывоопасные технологические процессы радиохимических производств предприятий ядерного топливного цикла;

III. Характеристики веществ и смесей, необходимые для оценки пожаровзрывоопасности технологических процессов;

IV. Условия возникновения воспламенения или взрыва при проведении технологических процессов радиохимических производств предприятий ядерного топливного цикла;

V. 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 объекты ЯТЦ, связанные со следующими технологическими операциями РХП:

- *хранение отработавших тепловыделяющих сборок;*
- *растворение металлосодержащего сырья;*
- *фильтрация;*
- *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 (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 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 паргазообразных продуктов после завершения теплового взрыва – 1,5–2,0 м³/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 паргазообразных продуктов теплового взрыва анионита в нитратной форме составляет 0,15 м³ на литр воздушно-сухого сорбента, для смесей его с 6–12 моль/л азотной кислотой – от 1,2 до 1,7 м³ 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 ПВБ 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 пределов безопасной эксплуатации 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 лава 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 газовоздушных 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 [17].

В состав данного РБ [17] 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 пунктов 6.7.7.1 – 6.7.7.3 и 6.7.11 ФНП [2], 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 [17] содержит рекомендации по проведению оценки пожаро-взрывоопасности 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 [17] 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 [17] 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 [17] 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 [17] 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 [17] 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 [17] 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 [7] 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 сорбцион-*

ных 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 [17]:

– 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 [17] 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, меньшие 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 [17] 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/дозировуемых 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 [18].

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 ОЯТЦ.

Приложение 3. Показатели и характеристики пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах ОЯТЦ.

Приложение 4. Перечень критериев оценки пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах ОЯТЦ.

Приложение 5. Рекомендуемые методы контроля за показателями пожаровзрывоопасности пирофорных материалов, применяемых в технологических процессах ОЯТЦ.

Приложение 6. Перечень нормативных документов, рекомендуемых для использования при обеспечении пожаровзрывобезопасности технологических процессов с применением пирофорных материалов на ОЯТЦ.

7.3.2. Назначение и область применения

Рекомендации по обеспечению ПВБ технологических процессов с применением пирофорных материалов на объектах ядерного топливного цикла разработаны в целях содействия соблюдению требований пп. 6.7.7.1 и 6.7.7.3 ФНП [2] в части, касающейся пирофорных материалов, а именно:

- *обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов объекта ядерного топливного цикла должно проводиться при наличии или образовании в технологических процессах пирофорных материалов;*
- *обоснование мер по предотвращению пожаровзрывоопасности химико-технологических процессов объекта ядерного топливного цикла должно быть проведено для пирофорных материалов на основе условий самовоспламенения.*

Действие РБ [18] 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 объекта ядерного топливного цикла.

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;
- монокририд урана;
- монокарбид урана;
- металлический плутоний;
- полоторный оксид плутония;
- металлический цирконий;
- губка металлического циркония;
- гидрид циркония;
- монокририд 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 [18] 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 предотвращения условий их воспламенения в [18] приведены три группы рекомендаций:

- по предотвращению контакта пирофорных материалов с воздухом и реакционно способными 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 [18] 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 [18] рекомендуется:

- ограничивать количество и (или) концентрации используемого пирофорного материала в составе технологической среды до минимально необходимого значения;
- ограничивать содержание аэрогеля и аэрозвеси 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 аэрогеля пирофорного материала на полу, оборудовании и инструменте.

Для предотвращения источников зажигания и саморазогрева пирофорного материала в [18] 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, исключаяющей 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 условия (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 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 [18] 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 [18] 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 [18] 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 [18] 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 [66] приведены следующие рекомендации и сведения по соблюдению взрывобезопасности на предприятиях по переработке облученного ядерного топлива:

– взрывоопасность анионообменных смол заключается в том, что полистирольные дивинилбензольные 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, разряжение 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 смолы должна быть подготовлена, обработана и переведена в безопасную форму.

Отмечены аварии на предприятиях по переработке ядерного топлива, связанные с упаркой рафинатов и реэкстрактов 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 $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2TBF$ и при низкой температуре упарки (129 °C) не разложилась, а выделилась в третью фазу («красное масло»).

Термическое разложение началось при 170 °C с выделением газов со скоростью 18 м³/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 °C.

Радиолиз воды под действием излучения сопровождается выделением водорода со скоростью 1 см³/(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 % (по объему).

В [67] 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. Соколов И. П., Шарафутдинов Р. Б. Введение в обеспечение взрывобезопасности объектов ядерного топливного цикла / Труды НТЦ ЯРБ. Ч. 1. Специфика взрывоопасности объектов ядерного топливного цикла. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2019. – 200 с.

2. 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 июля 2014 г., № 326.

3. Баратов А. Н., Иванов Е. Н., Корольченко А. Я. и др. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. – М.: Химия, 1987.

4. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ.

5. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. Сер. 09. Вып. 37. – М.: НТЦ ИППБ, 2003.

6. О безопасности химических производств: Федер. Закон о специальном техническом регламенте. – М.: Бытовая химия, 2010.

7. Розловский А. И. Взрывобезопасность паро-газовых систем в технологических процессах: [учебное пособие для химико-технологических специальностей вузов]. – М.: Химия, 1973.

8. О радиационной безопасности населения: Федер. закон от 09.01.1996 № 3-ФЗ.

9. Об использовании атомной энергии: Федер. закон от 21.11.1995 № 170-ФЗ.

10. О нормативных правовых актах в Российской Федерации: законопроект № 96700088-2.

11. О федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии: постановление Правительства Российской Федерации от 06.12.2012 № 1265.

12. Положение о порядке разработки руководств по безопасности при использовании атомной энергии, введении в действие и внесение в них изменений: утв. приказом Ростехнадзора от 21.12.2012 № 752.

13. 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.

14. О промышленной безопасности опасных производственных объектов: Федер. закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ.

15. 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.

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. 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.

18. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по обеспечению пожаровзрывобезопасности технологических процессов с применением пирофорных материалов. РБ-161-19: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 03.12.2019 № 459.

19. ГОСТ 12.1.044-2018. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения. М.: Стандартинформ, 2018. 195 с. (Система стандартов безопасности труда).

20. ГОСТ 12.1.010-76. Взрывобезопасность. Общие требования. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 7 с. (Система стандартов безопасности труда).

21. ГОСТ 12.1.004-91. Пожарная безопасность. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2006. 64 с. (Система стандартов безопасности труда).

22. ГОСТ Р 22.0.08.96. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Взрывы. Термины и определения. Принят и введен в действие постановлением Госстандарта России от 29.05.1996 № 333. Дата введения 01.07.1997.

23. 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.

24. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности. НП-055-14: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 22.08.2014 № 379.

25. 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.

26. 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.

27. 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 постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.12.2011 № 736.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-069-14: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 06.06.2014 № 249.

35. 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.

36. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Установки по иммобилизации трансурановых радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-076-06: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 27.12.1999 № 5.

37. 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.

38. 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.

39. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.12.2014 № 572.

40. 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.

41. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-019-15: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 10.08.2015 № 304.

42. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых

радиоактивных отходов. Требования безопасности. НП-020-15: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.06.2015 № 243.

43. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Обращение с газообразными радиоактивными отходами. Требования безопасности. НП-021-15: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25.06.2015 № 244.

44. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. НП-058-14: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 05.08.2014 № 347.

45. 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 30.12.2005 № 23.

46. 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 постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 30.11.2017 № 514.

47. 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 постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.05.2014 № 216.

48. Безопасность ядерного топливного цикла. Агентство по ядерной энергии (АЯЭ). Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР). 1993 г. Перевод Информ-Атом, 2000.

49. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Установки по производству плутонийсодержащего ядерного топлива. Требования безопасности. НП-098-17: утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23.06.2017 № 217.

50. 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.

51. Техническая документация. Правила пожарной безопасности при эксплуатации атомных станций. ППБ-АС-2011. Дата введения с 1 июля 2012.

52. 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 декабря 2015 г., № 522.

53. 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.

54. Гельфанд Б. Е., Попов О. Е., Чайванов Б. Б. Водород: параметры горения и взрыва. – М.: Физматлит, 2008.

55. Митрофанов В. В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. – Новосибирск, Изд-во Ин-та гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 2003.

56. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. – М., ГИИЛ, 1948.

57. Shapiro Z. M., Moffette R. T. Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident. WARD-SC-545, Westinghouse Electric Corp, 1957.

58. Назин Е. Р., Зачиняев Г. М. Пожаровзрывобезопасность технологических процессов радиохимических производств. М.: НТЦ ЯРБ, 2009.

59. Акулов Н. С. Теория цепных процессов. – М.–Л.: ГИТТЛ, 1951. – 336 с.

60. Соколов И. П., Позин А. В. Комплексная оценка мер по предотвращению условий самовоспламенения пирофорных материалов, применяемых и образующихся в технологических процессах ОЯТЦ. – М.: НТЦ ЯРБ, 2016.

61. Соколов И. П. Физико-химические условия самовоспламенения пирофорных материалов // Ядерная и радиационная безопасность. 2016. № 1 (79). С. 33–37.

62. Теория горения и взрыва: учебник и практикум для среднего профессионального образования / А. В. Тотай [и др.]; под общей редакцией А. В. Тотая, О. Г. Казакова. – М.: Издательство Юрайт, 2013.

63. Карауш С. А. Теория горения и взрыва. – М.: Издательство Юрайт, 2013.

64. Франк-Каменецкий Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987.

65. Бесчастнов М. В. Взрывобезопасность и противоаварийная защита химико-технологических процессов. – М.: Химия, 1983.

66. Громов Б. В., Савельева В. И., Шевченко В. Б. Химическая технология облученного ядерного топлива. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

67. Экспертиза КЯР установки по производству смешанного оксидного (МОКС) топлива Комиссии ядерного регулирования США / Химическая безопасность. Материалы совещания с представителями Госатомнадзора РФ, 2003.

ТРУДЫ НТЦ ЯРБ

И. П. Соколов, А. В. Понизов, Р. Б. Шарафутдинов
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

**ВВЕДЕНИЕ В ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

*Часть 2. Система нормативного обеспечения
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 21.12.2021
Тираж 150 экз.
Формат 60×84^{1/16}
Отпечатано в ФБУ «НТЦ ЯРБ»

ETSON

EUROPEAN
TECHNICAL SAFETY
ORGANISATIONS
NETWORK

Система менеджмента качества
ФБУ «НТЦ ЯРБ» сертифицирована
на соответствие требованиям
международного стандарта
ISO 9001:2015
и ГОСТ ISO 9001-2015.

ISBN 978-5-907011-39-7



9 785907 011397