

Владимирский государственный университет

В. В. ФИЛИПШОВ А. Н. СТАРИКОВ

**ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ
В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ
И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**



Владимир 2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

В. В. ФИЛИППОВ А. Н. СТАРИКОВ

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Учебно-практическое пособие

Электронное издание



Владимир 2024

ISBN 978-5-9984-1823-5

© ВлГУ, 2024

УДК 24.57
ББК 662.6

Рецензенты:
Доктор технических наук
профессор кафедры автоматизации, мехатроники и робототехники
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
О. В. Веселов

Кандидат технических наук
генеральный директор ООО «Рарок»
А. В. Власов

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Филиппов, В. В. Организация работ в экстремальных условиях и аварийных ситуациях [Электронный ресурс] : учеб.-практ. пособие / В. В. Филиппов, А. Н. Стариков ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2024. – 130 с. – ISBN 978-5-9984-1823-5. – Электрон. дан. (2,70 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены основные причины возникновения чрезвычайных и аварийных ситуаций, даны анализ и оценка рисков, классификация химически опасных объектов. Приведены параметры горения и взрыва, катализаторы и ингибиторы процесса. Изложены примеры расчета материального баланса процессов горения, определения предельного количества воздуха, стехиометрические уравнения, расчет теплового баланса, температуры и давления взрыва.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения с элементами дистанционных образовательных технологий по направлению подготовки 08.03.01 – Строительство, профиль подготовки «Теплогазоснабжение и вентиляция» (бакалавриат), а также для слушателей факультетов повышения квалификации, инженерно-технических работников, будет полезно для аспирантов, занимающихся проблематикой сжигания топлива.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 16. Ил. 2. Библиогр.: 35 назв.

ISBN 978-5-9984-1823-5

© ВлГУ, 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА РИСКОВ	
1.1. Термины и определения.....	8
1.2. Анализ рисков чрезвычайных ситуаций	9
1.3. Оценка рисков.....	9
1.4. Виды рисков и их показатели.....	9
1.5. Расчет усредненного индивидуального риска	11
1.6. Индекс смертности	12
1.7. Радиус поражения, расчет числа погибших	13
Контрольные вопросы.....	14
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА	
2.1. Смена концепции абсолютной безопасности на методологию приемлемого риска.....	15
2.2. Детерминированный подход	15
2.3. Вероятностный подход	18
2.4. Оценка риска при аварии со взрывами	20
Контрольные вопросы.....	25
3. КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ	
3.1. Основные потенциально опасные химические объекты.....	26
3.2. Классификация химически опасных объектов.....	26
3.3. Степень потенциальной опасности по масштабам последствий химической аварии	27
3.4. Степень потенциальной опасности по характеру развития возможной химической аварии	28
3.5. Общая степень потенциальной опасности химически опасных объектов	32
3.6. Примеры оценки потенциальной опасности химически опасных объектов.....	33
Контрольные вопросы.....	33

4. ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА. МЕТОДЫ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА	
4.1. Некоторые важные понятия молекулярной физики	35
4.2. Материальный баланс процессов горения.....	37
4.2.1. Уравнение материального баланса.....	37
4.2.2. Объем воздуха, необходимый для горения, и объем продуктов горения.....	38
4.3. Тепловой баланс процессов горения	42
4.3.1. Теплота сгорания вещества	42
4.3.2. Температура горения.....	43
4.3.3. Температура взрыва	47
4.4. Газовоздушные горючие смеси.....	49
4.4.1. Концентрационные пределы распространения пламени (КПР) и стехиометрическая концентрация	49
4.4.2. Расчет КПР по аппроксимационной формуле.....	50
4.4.3. Зависимость КПР от концентрации флегматизатора	51
4.5. Температурные параметры пожарной опасности	56
4.5.1. Температурные пределы распространения пламени	56
4.5.2. Температура самовоспламенения	57
4.6. Параметры взрыва газопаровоздушных смесей.....	60
4.6.1. Максимальное давление взрыва	60
4.6.2. Мощность взрыва и безопасное расстояние при воздействии воздушных ударных волн	61
Контрольные вопросы.....	63
5. МЕТОД РАСЧЕТА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ, РАЗВИВАЕМОГО ПРИ СГОРАНИИ ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПОМЕЩЕНИИ	
5.1. Выбор и обоснование расчетного варианта.....	64
5.2. Расчет избыточного давления для горючих газов, паров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей.	65
5.3. Горючие пыли	75
5.3.1. Расчет избыточного давления при сгорании пылевоздушной смеси в помещении.....	75
5.3.2. Характеристики сгорания пылепаровоздушных смесей в технологическом аппарате.	79
5.4. Расчет параметров волны давления при сгорании газопаровоздушных смесей в открытом пространстве	80
Контрольные вопросы.....	84

6. МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАЗМЕРОВ ЗОН, ОГРАНИЧЕННЫХ НИЖНИМ КОНЦЕНТРАЦИОННЫМ ПРЕДЕЛОМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ГАЗОВ И ПАРОВ	
6.1. Метод расчета размеров зон, ограниченных НКПР газов и паров, при аварийном поступлении горючих газов и паров ненагретых легковоспламеняющихся жидкостей в открытое пространство при неподвижной воздушной среде	85
6.2. Метод расчета размеров зон, ограниченных НКПР газов и паров, при аварийном поступлении горючих газов и паров ненагретых легковоспламеняющихся жидкостей в помещение...	88
Контрольные вопросы.....	93
7. ПЛАН ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ	
7.1. Общие положения. Термины и определения.....	94
7.2. Назначение Плана локализации и ликвидации аварий (ПЛА) и Плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС).....	95
7.3. Содержание и структура типового плана ликвидации аварии	96
7.4. Согласование и утверждение плана ликвидации аварии	96
7.5. Разработка плана ликвидации аварии	97
Контрольные вопросы.....	104
8. РАЗРАБОТКА ПАСПОРТА БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕКТА	
8.1. Необходимость и цели разработки паспорта безопасности	105
8.2. Разработка паспорта безопасности на потенциально опасных объектах	106
8.3. Особенности разработки паспорта безопасности	109
8.4. Содержание типового паспорта безопасности.....	109
Контрольные вопросы.....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	113
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ	116

ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины «Организация работ в экстремальных условиях и аварийных ситуациях» ставит своими целями овладение основами действующих нормативных документов по системам теплогазовентиляции (СТГВ), а также вопросами организации организации работ по предупреждению и ликвидации последствий аварийных и чрезвычайных ситуаций.

Развитие систем генерации топлива – важная задача современного общества. Одним из ее элементов следует назвать проектирование систем газоснабжения и установок для сжигания газа. Принятые проектировщиком решения могут отразиться не только на здоровье, но и на жизни жильцов, пользователей, потребителей газа, которыми все мы являемся, часто даже не отдавая себе в этом отчета.

Именно на этапе расчета или подбора оборудования и устройств, на этапе организации эксплуатации решается вопрос об эффективности и безопасности для человека и окружающей среды. Поэтому профессиональная подготовка специалиста, умеющего четко и умело действовать в условиях аварийных ситуаций, чрезвычайно важна.

В первой главе используется математический подход к определению класса опасности технического объекта; вводятся понятия «риск», «чрезвычайная ситуация», «авария» и др. Даются классификация рисков и примеры его расчета. Рассматриваются интенсивность отказов, индекс смертности, численные характеристики и методы их определения.

Вторая глава посвящена оценке рисков для промышленных объектов. Предложена смена понятия абсолютной безопасности на понятие «приемлемый риск», рассматриваются метод детерминированного подхода в определении величины риска и вероятностный метод. Даются модель взрыва и методы расчета рисков; показаны примеры расчета.

Третья глава оперирует понятиями опасных химических объектов. Даются их классификация, степень потенциальной опасности, рас-

чет риска и вероятность проявления опасности. Вводится понятие «степень химической опасности», приведены способы ее определения по сводным таблицам.

Четвертая глава определяет параметры горения и взрыва. Даются основы молекулярной физики, базовые уравнения, приводятся материальный баланс реакции горения, бедные и богатые смеси, диапазоны горения (взрываемости) по концентрации, объемы топливоокислителя, скорости горения, количество продуктов горения, влажностные характеристики химических реакций горения.

Пятая глава приводит модели и методы расчета взрывов как динамической системы. Рассматриваются понятия горения в ламинарном и турбулентном потоке, нормальное и детонационное горение, горение в неподвижной среде. Отдельно рассмотрено образование горения (взрыв) при наличии пылепаровоздушной смеси.

В шестой главе изучены вопросы геометрии и пространственных характеристик образования зоны воспламенения и области концентрационно опасной зоны. Даны методы и примеры расчета данных зон.

Седьмая глава посвящена рассмотрению вопросов действия в реальных нештатных ситуациях. Даются определения понятий «авария», «взрыв» и др. Описываются структура и назначение плана локализации и ликвидации последствий аварии. Приводятся структура и порядок утверждений и согласований при разработке данных планов.

Восьмая глава определяет структуру паспорта безопасности на опасный производственный объект, необходимость его разработки, последовательность, специфику и особенности. Дается пример составления типового паспорта безопасности.

При работе над книгой автор опирался не только на работы классиков, но также на современные источники, так как современное производство и системы эксплуатации имеют широкие цифровые, технологические и мультимедийные возможности по наблюдению, контролю и даже принятию решений.

1. ВЕРОЯТНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ, АНАЛИЗ И ОЦЕНКА РИСКОВ

1.1. Термины и определения

Вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) применительно к потенциально опасным объектам (ПОО) оценивают на основе статистических данных или теоретических исследований по величине риска.

Аварии в техносфере исключить практически невозможно. Поэтому в конце XX века в связи с постоянным усложнением промышленного оборудования возникла и начала развиваться новая научная дисциплина – теория безопасности, или теория риска, предшественницей которой является теория надежности.

Под *риском* понимается частота или вероятность возникновения нежелательного события или вероятность реализации негативного воздействия в зоне пребывания человека.

Риск возникновения чрезвычайной ситуации – вероятность, или частота возникновения источника чрезвычайной ситуации, определяемая соответствующими показателями риска.

Риски аварий можно снижать, но нельзя забывать о том, сколько за это придется заплатить. Вкладывая средства в технические системы предотвращения аварий, государство вынуждено сокращать финансирование социальных программ (жилищной, медицинской и др.), что влечет за собой сокращение средней продолжительности жизни человека и снижение ее качества.

Средства на снижение риска аварий вкладываются в технические системы безопасности, в подготовку персонала и в совершенствование управления при чрезвычайных ситуациях. Если в первых двух случаях средства расходуются на снижение вероятности аварии, то в третьем – на уменьшение последствий ЧС. Анализ эффективности затрат показывает, что во многих случаях можно результативно снизить риск для населения, вложив больше средств в третью компоненту.

При измерении риска существуют четыре подхода: инженерный, модельный, экспортный и социальный. Многокритериальный выбор определения риска описывается теорией принятия решения. Рассмотрение проблемы с разных сторон позволяет выработать общее согласованное решение.

На стадии проектирования объекта решение нужно принимать исходя из ситуации в конкретной местности: находящиеся рядом объекты не должны влиять друг на друга, создавая дополнительный риск. АЭС неразумно располагать вблизи ТЭС. Вокруг АЭС повышается влажность воздуха, а выбросы окиси серы на ТЭС при взаимодействии с водой образуют серную кислоту и, соответственно, кислотные дожди.

При определении степени ПОО по риску возникновения аварии на объекте критерием служит совокупность факторов риска возникновения чрезвычайной ситуации. Техногенные аварии можно предупредить и предотвратить. Уменьшение технического риска требует определенных экономических затрат. Вследствие того что экономические затраты как на стадии проектирования, так и в ходе эксплуатации бывают недостаточными, возникают условия для совершения аварий. Таким образом, техногенные ЧС человек в состоянии предотвратить.

При проектировании объекта проводится анализ возможных рисков и прогнозируется вероятность возникновения как одолимых (управляемых), так и неодолимых (неуправляемых) факторов риска.

1.2. Анализ рисков чрезвычайных ситуаций

Анализ рисков включает процесс определения опасности и оценку воздействия рисков на людей, имущество и окружающую среду. Он является одним из элементов обеспечения промышленной безопасности в стране. Основными этапами анализа рисков следует назвать планирование и организацию работ, идентификацию опасностей, непосредственную оценку риска, разработку рекомендаций по уменьшению риска.

1.3. Оценка рисков

Оценка рисков включает анализ частоты опасных ситуаций, последствий, неопределенностей; сравнение результатов с критериями приемлемого риска, обобщение данных.

1.4. Виды рисков и их показатели

Различают следующие виды чрезвычайных ситуаций:

- *потенциальный* (территориальный) – пространственное распределение частоты реализации конкретной ЧС;

- *индивидуальный* – частота поражения отдельного индивидуума в результате воздействия конкретной ЧС, иногда этот вид ЧС называют профессиональным или смертельным;
- *коллективный* – ожидаемое количество смертельных исходов в результате возможных ЧС за определенное время;
- *социальный* – зависимость частоты возникновения событий, вызывающих поражение определенного числа людей, от этого числа людей;
- *приемлемый и неприемлемый*.

В настоящее время сложились представления о величинах приемлемого (допустимого) и неприемлемого риска. Неприемлемый риск имеет вероятность реализации негативного воздействия более $1 \cdot 10^{-3}$, приемлемый – менее $1 \cdot 10^{-6}$. При значениях риска от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^{-6}$ принято различать переходную область значения риска.

В том случае, когда величина потерь известна, но не может быть выражена количественно, например цена человеческой жизни, риск можно оценивать вероятностной составляющей.

Риск (степень риска) можно оценивать, используя в ряде случаев статистические данные по вероятности нежелательного события. Некоторые примеры усредненного индивидуального риска со смертельным исходом по различным причинам приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Величина усредненного индивидуального риска

Причина	Индивидуальный риск, год ⁻¹	Причина	Индивидуальный риск, год ⁻¹
Болезни сердца	$8,5 \cdot 10^{-3}$	Гибель на воде	$3,3 \cdot 10^{-5}$
Рак	$1,6 \cdot 10^{-3}$	Авиакатастрофа	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Падение с высоты	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Автокатастрофа	$2,5 \cdot 10^{-4}$
Пожары и взрывы	$4,0 \cdot 10^{-5}$	Удары от падающих предметов и поражение электротоком	$6,0 \cdot 10^{-6}$

1.5. Расчет усредненного индивидуального риска

Основой расчета усредненного индивидуального риска смертельного исхода является коллективный риск R , который рассчитывается по формуле

$$R = P_{ав} \cdot P_{см}, \text{ см/г.},$$

где $P_{ав}$ – частота (вероятность) аварий;

$P_{см}$ – частота (вероятность) смертей.

Индивидуальный риск r определяется по формуле

$$r = R/N = P_{ав} \cdot P_{см} / N, \text{ см/чел.г.},$$

где N – количество людей, населения.

Пример расчета коллективного риска

В Российской Федерации происходит примерно 14,0 млн дорожно-транспортных происшествий (ДТП). Одно из 400 ДТП заканчивается смертью. Численность населения Российской Федерации равна 142 млн человек.

Определить коллективный риск (см/(чел. г.) при эксплуатации автотранспорта, а также к какой степени потенциальной опасности по классификации объектов по риску возникновения аварии (ПО₄) относится автотранспорт следует по формулам

$$R = P_{ав} P_{см} = 14,0 \cdot 10^6 \cdot 1/400 = 35000 \text{ чел./г.}$$

$$R = 35000/142 \cdot 10^6 = 2,46 \cdot 10^{-4} \text{ см/чел.г.}$$

Вывод: автотранспорт относится к очень опасным объектам.

Вероятность аварии $P_{ав}$ связана с возможностью отказов и сбоев в работе отдельных элементов производства, т. е. с ненадежностью этих элементов

$$P_{ав} = K_{ав} \cdot P_{отк},$$

где $P_{ав}$ – коэффициент аварийности ($K_{ав} = N_{ав} / N_{отк}$);

$P_{отк}$ – вероятность отказа элемента ($P_{отк} = 1 - P_{(t)}$),

где $P_{(t)}$ – вероятность безотказной работы элемента системы в течение времени t (характеризует его надежность).

Для экспоненциального закона распределения потока отказов

$$P_{(t)} = e^{-\lambda t},$$

где λ – интенсивность отказов за время t .

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это плотность вероятности отказов элемента за следующую малую величину времени Δt . Следова-

тельно, вероятность безотказной работы до момента $(t + \Delta t)$ при условии, что элемент уже проработал без отказов до момента t , можно определить в виде

$$P_{(t,t+\Delta t)} = e^{-\lambda \Delta t},$$

а вероятность аварии рассчитать по формуле

$$P_{ав} = K_{ав} (1 - e^{-\lambda \Delta t}).$$

Рассмотренный способ дает лишь приближенное значение вероятности возникновения реальной аварии соответствующего риска. Оценка потенциальной опасности любой ЧС заключается в определении возможных последствий аварий:

- масштабов действия основных поражающих факторов при различных сценариях аварий;
- числа пострадавших и структуры поражения;
- материального ущерба.

1.6. Индекс смертности

В качестве меры опасности для человека используется понятие «удельная смертность» (индекс смертности M), т. е. отношение числа погибших N к количеству опасного химического вещества (ОХВ)

$$M = N/Q, \text{ чел./т.}$$

Средние величины удельной смертности представлены в табл. 1.2

Таблица 1.2

Средние величины (индекс) удельной смертности
для некоторых опасных химических веществ

Наименование ОХВ	Индекс смертности, чел./т ($M_{ср}$)
Сероуглерод	0,02
Аммиак	0,05
Фтористый водород, сернистый газ	0,13
Сероводород, треххлористый фосфор	0,20
Хлор, пикрин, фосген	0,50
Метилизоцианат	12,5

По количеству опасного вещества и его удельной смертности можно оценивать потенциальную опасность объекта. Критериями опасности являются :

- превышение порогового уровня смертности, обычно принимаемого равным 10 человек;

- выход границы зоны поражения за пределы объекта и его санитарно-защитной зоны (СЗЗ).

I кл. – 1000 м, II кл. – 500 м, III кл. – 300 м, IV кл. – 100 м, V кл. – 50 м.

Из формулы $M = N/Q$ по пороговому уровню смертности ($N_{\text{пр}} = 10$ человек) и средней величине индекса смертности M можно определить предельное количество опасного вещества $Q_{\text{пред}}$ на предприятии, которое требует разработки Декларации безопасности ОПО.

Определить $Q_{\text{пред}}$ для хлора при $M = 0,5$.

$$Q_{\text{пред}} = \frac{N_{\text{пор}}}{M} = \frac{10}{0,5} = 20 \text{ т.}$$

Исходя из критериев опасности можно рассчитать и соответствующее пороговое количество опасного вещества, определить потенциальную опасность и класс опасности предприятия.

Удельная смертность может быть использована и при оценке опасности ЧС природного характера. Так, при оценке землетрясений в формулу удельной смертности вместо количества вещества Q подставляют значение интенсивности землетрясения.

1.7. Радиус поражения, расчет числа погибших

Расчет радиуса поражения при взрывах производят исходя из давления во фронте воздушной ударной волны, приводящего к гибели человека. Радиус токсического поражения равен глубине зоны заражения с поражающими концентрациями опасных химических веществ.

При наложении зон действия нескольких поражающих факторов расчет числа погибших производят по наиболее опасному фактору.

Число погибших при взрыве взрывчатого вещества рассчитывают по формуле

$$N = P \cdot Q \cdot 0,666, \text{ чел.},$$

где P – плотность населения (персонала объекта экономики), чел./км²;

Q – масса взрывчатого вещества, т.

Радиус смертельного поражения определяют по формуле

$$R = 18,4 \cdot Q^{0,33} \text{ м.}$$

При взрыве топливо- или газозвушной смеси число погибших примерно в 3 раза больше, чем при взрыве взрывчатого вещества, а ра-

диус смертельного поражения больше в 1,6 раза. При химической аварии по формуле удельной смертности можно определить число погибших $N = M \cdot Q$.

Радиус поражения ОХВ численно равен глубине зоны заражения с поражающими концентрациями.

В качестве выводов по данному вопросу следует заметить, что при взаимодействии человека с техникой аварии и катастрофы возникают в основном по вине человека. Это связано с недостаточными экономическими затратами, неграмотной эксплуатацией техники (ДТП) и другими причинами.

Для более полной характеристики объектов потенциальной опасности (ОПО) необходимо провести их классификацию по различным степеням потенциальной опасности. Такая классификация особенно необходима для химических опасных объектов как наиболее сложных производств.

Контрольные вопросы

Дайте определение риска возникновения чрезвычайной ситуации.

Каковы основные этапы анализа риска?

Что включает в себя оценка риска?

Назовите виды рисков и их характеристики.

Как определить усредненный индивидуальный риск?

Как определить вероятность аварии, связанной с возможностью отказов и сбоев в работе отдельных элементов производства?

Дайте определение удельной смертности (индекса смертности M).

Дайте определение санитарно-защитной зоны объекта.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И РИСКА

2.1. Смена концепции абсолютной безопасности на методологию приемлемого риска

До последнего времени анализ безопасности проводился на основе методологии абсолютной безопасности, предполагающей, что все расчеты должны проводиться на основе наиболее неблагоприятных сочетаний нагрузок и внешних воздействий, и подобными детерминистическими методами. В рамках такого подхода считалось, что наличие запаса, например запаса прочности, гарантирует безопасность объекта. При этом игнорировалось маловероятное, но возможное сочетание неблагоприятных факторов, которое могло бы привести к аварии.

Техногенные катастрофы показали, что концепция абсолютной безопасности неадекватна вероятностной природе аварий, порождаемых именно маловероятными факторами. Можно ожидать, что по мере увеличения срока эксплуатации сложных объектов уже нельзя пренебрегать развитием аварийных ситуаций, ассоциируемых с частотой возникновения в 10^{-3} - 10^{-4} г.⁻¹, так как в силу вероятностного закона больших чисел наступление нежелательного события (аварии) для таких систем становится вполне вероятным.

Это обстоятельство привело к смене концепции абсолютной безопасности на современную методологию приемлемого риска.

Участившиеся аварии стимулировали развитие вероятностных методов анализа безопасности. Существуют два подхода к нормированию в области обеспечения экологической и промышленной безопасности: детерминированный и вероятностный.

2.2. Детерминированный подход

Детерминированный подход основан на определенной количественной дифференциации и распределении чрезвычайных ситуаций, производственных объектов, технологических процессов, зданий и сооружений, производственного оборудования по степени опасности на категории, классы и тому подобное, определяемые по параметру, характеризующему потенциальную энергию взрыва, опасные характери-

стики и параметры производственных процессов, количество пораженных и пострадавших, а также разрушающие последствия пожара и взрыва. При этом назначаются конкретные количественные границы этих категорий, классов и т. п.

Примерами действующих в Российской Федерации нормативных документов, носящих детерминированный характер, являются Нормы пожарной безопасности (НПБ 105-03); Правила устройства электроустановок (ПУЭ); Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (ПБ 09-540-03); Строительные нормы и правила (СНиП) и др.

Детерминированный метод расчета предполагает сравнение каких-либо параметров с заранее заданными. Принимая в расчетах худшие варианты событий, приводящие к аварийной ситуации, указывают конкретные условия расчетов и возможные допущения, что оправдывает сравнимость результатов.

К достоинствам детерминированного подхода относятся достаточный для различных реальных ситуаций набор необходимых сведений; сравнительная простота использования методов категорирования; высокая степень завершенности элементов этих методов и однозначность решения задач категорирования; выбор мероприятий защиты, регламентированных нормами применительно к установленным категориям.

Недостатком этого подхода считаются ограниченная возможность варьирования при определении категорий и то, что нередко его применение обуславливает затруднения по применению прогрессивных проектных решений и излишние затраты на реализацию этих решений.

Основными нормативными документами для таких расчетов служат межотраслевые нормы и правила НПБ 105-03, ПУЭ, ПБ 09-540-03.

В настоящее время основополагающим документом, устанавливающим степень пожаровзрывоопасности проектируемого объекта, являются нормы НПБ 105-03. Этим документом предусматривается категорирование производственных и складских помещений, зданий и сооружений, наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

При расчете категории учитывается возможность аварийной разгерметизации одной наиболее крупной единицы технологического оборудования с наиболее пожаровзрывоопасным веществом. Основным критерием отнесения того или иного помещения к взрывопожароопасным следует назвать избыточное давление взрыва ΔP , превышающее нормированное, величина которого 5 кПа и одинакова для любых объектов.

Взрывопожароопасные категории дополнительно делятся, исходя из свойств обращающихся веществ, материалов и продуктов. Так, из всех категорий А, Б, В, Г, Д первые две (А и Б) считаются взрывопожароопасными, а категории В1 – В4 – пожароопасными.

В зависимости от установленной категории пожаровзрывоопасности помещения, здания или сооружения предусматриваются определенные объемно-планировочные решения и профилактические мероприятия в соответствии с нормами СНиП 21-01-97.

В действующих ПУЭ в качестве критерия взрывоопасности производственных зон принят относительный объем взрывоопасной смеси. Если этот относительный объем превышает 5 %, то вся зона признается взрывоопасной классов В-I; В-II; В-Ia; В-IIa, в противном случае взрывоопасной считается зона на расстоянии до 5 м от источника появления горючей смеси (технологического аппарата) в помещении или на нормированном расстоянии. В ряде случаев при объеме смеси меньше 5 % от свободного объема все помещение может быть отнесено к классу В-Iб. Категорирование по НПБ 105-03 определяет, кроме правил и норм техники безопасности, требования к строительной части, а по ПУЭ – к оборудованию.

Несколько иначе подходят к выбору критерия категорирования по взрывопожароопасности согласно ПБ 09-540-03. За основу принята суммарная потенциальная энергия, заключенная в технологическом процессе. Степень взрывоопасности технологических блоков определяется суммарным энергетическим потенциалом.

По значениям потенциальной энергии взрывоопасности рассчитывают классификационные величины:

– приведенную массу, в общем случае не равную массе горючих добавок в расчетах по НПБ 105-03;

– относительный энергетический потенциал взрывоопасности. Обе эти величины жестко связаны между собой и из одной можно получить другую. Однако считается целесообразным рассчитывать их независимо и по ним проводить категорирование технологических блоков и объектов.

По значениям приведенной массы относительного энергетического потенциала взрывоопасности производится категорирование технологических блоков по трем возможным категориям взрывоопасности: I, II, III.

В зависимости от категории взрывоопасности правилами ПБ 09-540-03 устанавливаются определенные ограничения и назначаются необходимые для обеспечения взрывобезопасности мероприятия.

2.3. Вероятностный подход

Вероятностный подход основан на концепции допустимого риска с расчетом вероятности достижения определенного уровня безопасности и предусматривает недопущение воздействия на людей опасных факторов производственной среды с вероятностью, превышающей нормативную. Нормативными документами, основанными на вероятностном подходе, являются ГОСТ 12.1.010-76 ССБТ «Взрывобезопасность. Общие требования», ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ «Пожарная безопасность. Общие требования», ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ «Пожарная безопасность технологических процессов» и Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09. «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009).

Вероятностный подход считается более прогрессивным и совершенным, поскольку дает возможность нахождения оптимального варианта проектного решения. Он основан на количественной зависимости между опасными производственными факторами, приносимым материальным ущербом и вероятностью реализации опасных факторов с учетом защитных мер. С помощью вероятностных методов можно находить оптимальные технические решения для конкретных объектов.

Однако этот подход более сложен и требует многочисленных дополнительных сведений (например, статистических данных о пожарах и взрывах для однотипных объектов, сведений о надежности оборудо-

вания и систем), которые, как правило, отсутствуют. Главным затруднением в использовании этого подхода можно назвать необходимость учета человеческого фактора и надежности системы «человек – машина».

Рассмотрим использование вероятностного подхода на примере возникновения взрывоопасной ситуации. Поскольку взрыв может быть при одновременном существовании по крайней мере двух независимых факторов – появление горючей смеси и инициирующего фактора – вероятность взрыва может быть представлена как произведение вероятностей

$$Q(t) = Q_1(t)Q_2(t),$$

где $Q_1(t)$ – вероятность появления взрывоопасной смеси, 1/г.;

$Q_2(t)$ – вероятность инициирования взрыва, 1/г.

В свою очередь, вероятности $Q_1(t)$ и $Q_2(t)$ могут быть представлены произведениями вероятностей появления горючего и окислителя Q_1 и характеристик инициирующего фактора Q_2 . Если взрыв возможен без наличия какого-либо фактора, то его величина принимается равной единице.

Нормативные документы разрешают проводить эти расчеты по упрощенным зависимостям. На стадии проектирования предполагается экспоненциальное распределение, и вероятность события определяют по теоретической формуле

$$Q_i(t) = 1 - e^{-\lambda_i t},$$

где λ_i – интенсивность событий, 1/г.

В действующих установках вероятность аналогичного события находится по зависимости

$$Q_i(t) = \left\{ \frac{K_6}{t_p} \right\} \sum_{i=1}^n t_i,$$

где K_6 – коэффициент безопасности ($K_6 = 1$ при $n = 1$);

t_i – время существования причины события, ч.

Обеспечив нормированную вероятность отсутствия взрыва, можем считать технологическую установку (объект) взрывозащищенной. Однако вероятностные расчеты провести не всегда возможно из-за отсутствия достоверных статистических данных.

2.4. Оценка риска при аварии со взрывами

Прогнозирование и оценка обстановки при чрезвычайных ситуациях проводятся для заблаговременного принятия мер по предупреждению ЧС, смягчению их последствий, ликвидации последствий аварий, катастроф и стихийных бедствий. В результате оценки определяют:

- радиус зоны поражения;
- степень ущерба материальным ресурсам;
- степень травмирования людей;
- вероятность причинения ущерба людям и материальным ресурсам.

При прогнозировании последствий опасных явлений используют детерминистскую и вероятностную модели. В *детерминистской модели* определенной величине негативного воздействия поражающего фактора соответствует вполне конкретная степень поражения людей и материальных ресурсов (инженерно-технических сооружений). Например, при детерминистском способе прогнозирования поражающий эффект ударной волны определяется избыточным давлением во фронте ударной волны ΔP_{ϕ} (кПа), в зависимости от которого находится степень поражения людей и инженерно-технических сооружений. Этот подход отражен в табл. 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1

Зависимость степени поражения человека от избыточного давления во фронте ударной волны (ΔP_{ϕ} , кПа)

ΔP_{ϕ} , кПа	< 10	10 – 40	40 – 60	60 – 100	> 100
Степень поражения человека	Безопасный уровень	Легкая (ушибы, повреждения слуха)	Средняя (кровотечение, вывихи, сотрясение мозга)	Тяжелая (контузии, разрывы внутренних органов)	Смертельное поражение

Таблица 2.2

Зависимость степени разрушения зданий от избыточного давления во фронте ударной волны ($\Delta P_{\text{ф}}$, кПа)

Объект (жилые здания)	Разрушение			
	Полное	Сильное	Среднее	Слабое
Кирпичные многоэтажные	30 – 40	20 – 30	10 – 20	8 – 10
Кирпичные малоэтажные	35 – 45	25 – 35	15 – 25	8 – 15
Деревянные	20 – 30	12 – 20	8 – 12	6 – 8

По табл. 2.2 делаем следующий вывод:

- слабые разрушения – повреждение или разрушение крыш, окон, дверных проемов, ущерб – 10 – 15 % от стоимости здания;
- среднее разрушение – разрушение крыш, окон, перегородок, чердачных перекрытий, верхних этажей, ущерб – 30 – 40 % от стоимости здания;
- сильные разрушения – разрушение несущих конструкций и перекрытий, ущерб – 50 %, ремонт нецелесообразен;
- полное разрушение – обрушение зданий.

При использовании *вероятностной модели* подход иной: при воздействии одной и той же дозы негативного воздействия предполагается, что поражающий эффект будет различен в зависимости от категории людей и типа материальных ресурсов. Другими словами, негативное воздействие поражающих факторов носит вероятностный характер. Величина вероятности поражения $P_{\text{пор}}$ (эффект поражения) измеряется в долях единицы или процентах и определяется по функции Гаусса через пробит-функцию

$$P_{\text{пор}} = f [P_r (D)],$$

где P_r – пробит-функция, которая в общем виде записывается как

$$P_r = a + b \ln D,$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, характеризующие степень опасности поражающего фактора;

D – переменная, зависящая от уровня поражающего фактора.

Для определения вероятности поражения через пробит-функцию используют табл. 2.3.

Таблица 2.3

Соотношение между значениями пробит-функции и вероятностью поражения

$P, \%$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
0	-	2,67	2,95	3,12	3,25	3,36	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,90	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,56	6,64	6,75	6,88	7,05	7,19
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

В табл. 2.4 представлен вид пробит-функции для разных степеней поражения человека и разрушений зданий. В ней представлено:

m – масса человека, кг;

P_0 – атмосферное давление, кПа;

I_+ – импульс фазы сжатия, кПа·с.

Таблица 2.4

Вид пробит-функции при поражающем действии ударной волны

Степень поражения	Пробит-функция (P_r)
Поражение человека	
Разрыв барабанных перепонок	$P_r = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P_\phi$
Контузия	$P_r = 5 - 5,74 \ln \left\{ \frac{4,2}{1 + \Delta P_\phi / P_0} + \frac{1,3}{P_0^{1/2} m^{1/3}} \right\}$
Летальный исход	$P_r = 5 - 2,44 \ln \left\{ \frac{7,38}{\Delta P_\phi} + \frac{1,9 \cdot 10^3}{\Delta P_\phi \cdot I_+} \right\}$
Разрушение зданий	
Слабые разрушения	$P_r = 5 - 0,26 \ln \left\{ \left(\frac{4,6}{\Delta P_\phi} \right)^{3,9} + \left(\frac{0,11}{I_+} \right)^5 \right\}$
Средние разрушения	$P_r = 5 - 0,26 \ln \left\{ \left(\frac{17,5}{\Delta P_\phi} \right)^{8,4} + \left(\frac{0,29}{I_+} \right)^{9,3} \right\}$
Сильные разрушения	$P_r = 5 - 0,22 \ln \left\{ \left(\frac{40}{\Delta P_\phi} \right)^{7,4} + \left(\frac{0,46}{I_+} \right)^{11,3} \right\}$

Для определения зависимости избыточного давления во фронте ударной волны от расстояния до эпицентра взрыва *конденсированного (твердого) взрывчатого вещества* часто используют формулу Садовского

$$\Delta P_{\phi} = 95 \frac{G_{\text{ТНТ}}^{1/2}}{R} + 390 \frac{G_{\text{ТНТ}}^{2/3}}{R^2} + 1300 \frac{G_{\text{ТНТ}}}{R^3},$$

где R – расстояние до эпицентра взрыва, м;

$G_{\text{ТНТ}}$ – тротильный эквивалент взорвавшегося вещества, определяется по формуле, кг,

$$G_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{ВВ}}}{Q_{\text{ТНТ}}} G,$$

где $Q_{\text{ВВ}}$ и $Q_{\text{ТНТ}}$ – энергия взрывов рассматриваемого взрывчатого вещества и тротила соответственно, кДж/кг;

G – масса взорвавшегося конденсированного вещества, кг.

Импульс фазы сжатия (кПа·с) для конденсированного (твердого) взрывчатого вещества находится по формуле

$$I_{+} = \frac{0,4G_{\text{ТНТ}}^{2/3}}{\sqrt{R}}.$$

Для случая *взрыва парогазовоздушного облака* формула Садовского будет иметь вид

$$\Delta P_{\phi} = 81 \frac{m_{\text{пр}}^{1/3}}{R} + 303 \frac{m_{\text{пр}}^{2/3}}{R^2} + 505 \frac{m_{\text{пр}}}{R^3},$$

где $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса пара или газа, участвующего во взрыве, которая рассчитывается по формуле, кг,

$$m_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{ВВ}}}{Q_{\text{ТНТ}}} mZ,$$

где $Q_{\text{ВВ}}$ и $Q_{\text{ТНТ}}$ – энергия взрывов рассматриваемого взрывчатого вещества и тротила соответственно, кДж/кг;

m – масса газообразного вещества, поступившего в окружающее пространство, кг;

Z – коэффициент участия горючих газов и паров в горении.

Импульс фазы сжатия для взрыва парогазовоздушного облака находится по формуле, кПа·с,

$$I_{+} = \frac{0,123m_{\text{пр}}^{2/3}}{\sqrt{R}}.$$

Остальные необходимые формулы для расчета параметров взрыва различных взрывчатых веществ см. в учебном пособии С. С. Тимофеевой, Т. И. Дроздовой «Теория горения и взрыва».

Пример 2.1. На складе взрывчатых веществ хранится октоген массой $G = 50\,000$ кг. На расстоянии 100 м от склада находится одноэтажное здание механических мастерских, а на расстоянии 500 м поселок с многоэтажными кирпичными зданиями. Энергия взрыва октогена 5 860 кДж/кг, энергия взрыва тротила 4 520 кДж/кг. Найти вероятность различных разрушений зданий механических мастерских и зданий в поселке.

Решение: найдем тротильный эквивалент взорвавшегося октогена

$$G_{\text{ТНТ}} = \frac{5860}{4520} 50\,000 = 64\,823 \text{ кг.}$$

Избыточное давление во фронте ударной волны на уровне механических мастерских (100 м от эпицентра)

$$\begin{aligned} \Delta P_{\phi}^{100} &= 95 \frac{64823^{\frac{1}{3}}}{100} + 390 \frac{64823^{\frac{2}{3}}}{100^2} + 1300 \frac{64823}{100^3} = \\ &= 185,36 \text{ кПа.} \end{aligned}$$

Полученная величина избыточного давления соответствует полному разрушению здания механических мастерских (см. табл. 2.1).

Избыточное давление во фронте ударной волны на уровне поселка (500 м от эпицентра)

$$\Delta P_{\phi}^{500} = 95 \frac{64823^{1/3}}{500} + 390 \frac{64823^{2/3}}{500^2} + 1300 \frac{64823}{500^3} = 10,8 \text{ кПа.}$$

Определим вероятность разрушений зданий в поселке по пробит-функции, предварительно рассчитав импульс фазы сжатия:

$$I_{+} = \frac{0,4 \cdot 64823^{2/3}}{\sqrt{500}} = 29 \text{ кПа} \cdot \text{с.}$$

Таким образом определим вероятность слабых разрушений

$$Pr = 5 - 0,26 \ln \left\{ \left(\frac{4,6}{10,8} \right)^{3,9} + \left(\frac{0,11}{29} \right)^5 \right\} = 5,86.$$

По табл. 2.3 значению пробит-функции, равной 5,86, соответствует вероятность слабых разрушений на уровне 81%.

Для средних разрушений

$$P_r = 5 - 0,26 \ln \left\{ \left(\frac{17,5}{10,8} \right)^{8,4} + \left(\frac{0,29}{29} \right)^{9,3} \right\} = 3,95.$$

По табл. 2.3 значению пробит-функции равной 3,95, соответствует вероятность слабых разрушений на уровне 16 %.

Для сильных разрушений

$$P_r = 5 - 0,22 \ln \left\{ \left(\frac{40}{10,8} \right)^{7,4} + \left(\frac{0,46}{29} \right)^{11,3} \right\} = 2,87.$$

По табл. 2.3 значению пробит-функции, равной 2,87, соответствует вероятность слабых разрушений на уровне 2 %. *Вывод:* в результате взрыва октогена на складе взрывчатых веществ в поселке, расположенном на расстоянии 500 м от склада, будут преимущественно слабые разрушения зданий, сопровождающиеся повреждением или разрушением крыш, окон, дверных проемов.

Контрольные вопросы

Какое обстоятельство привело к смене концепции абсолютной безопасности на современную методологию приемлемого риска?

На чем основаны детерминированный и вероятностный подходы к нормированию в области обеспечения экологической и промышленной безопасности?

Назовите достоинства и недостатки детерминированного и вероятностного подходов к нормированию в области обеспечения экологической и промышленной безопасности.

В чем отличие в применении вероятностной и детерминистской моделей при определении ущерба от взрыва?

Что является поражающим фактором при аварии со взрывом?

Что такое пробит-функция?

От каких параметров взрыва зависит степень поражения людей и материальных ресурсов?

Как определить вероятность разной степени поражения людей при аварии со взрывом?

Как оценить вероятность разной степени разрушения зданий и сооружений при аварии со взрывом?

3. КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ

3.1. Основные потенциально опасные химические объекты

Под химически опасными объектами понимаются такие объекты экономики, при аварии или разрушении которых могут произойти массовые поражения людей, животных и растений опасными химическими веществами.

Значительная часть предприятий по производству и использованию опасных химических и взрывоопасных веществ сосредоточена в химической, нефтегазохимической, пищевой и сельскохозяйственной промышленности.

К основным потенциально опасным объектам (ПОО) относятся:

- комбинаты пищевой промышленности, использующие в большом количестве аммиак;
- крупнотоннажные склады аммиака;
- предприятия (станции), потребляющие хлор в количествах до 50 т в сутки;
- водоочистные сооружения крупных городов, потребляющие и хранящие хлор в количестве более 25 – 50 т;
- объекты, имеющие одновременно запас хлора и аммиака;
- базы по хранению хлорпикрина и бромистого метила;
- производства, использующие минеральные кислоты (соляную, серную и др.);
- объекты железнодорожного транспорта;
- аммиакопровод «Гольятти – Одесса» (линейные магистрали и объекты на нем).

3.2. Классификация химически опасных объектов

Все химически опасные объекты (ХОО) классифицируются по степени потенциальной опасности. В основе этой классификации лежит количественная оценка степени потенциальной опасности (ПО):

- по масштабам возможных последствий химической аварии на ХОО (ПО₁);
- характеру развития (вероятному «сценарию») возможной химической аварии (ПО₂);

- степени токсической опасности ОХВ, используемых на ХОО (ПО₃);
- риску возникновения аварии на ХОО (ПО₄);
- пожаро- и взрывоопасности объекта (ПО₅).

Источником информации для классификации ХОО являются:

- декларация безопасности объекта;
- паспорт безопасности (аварийная карточка) ОХВ, используемый на ХОО (согласно ГОСТ 50586-93 и требованиям ООН);
- методика прогнозирования масштабов зон заражения ОХВ при авариях и разрушениях на ХОО (Штаб ГО и Госкомгидромет. М., 1990);
- методика определения пожаро- и взрывоопасности объекта (директива ЕС- 82/50/ЕЕС).

3.3. Степень потенциальной опасности по масштабам последствий химической аварии

В классификации степени потенциальной опасности по *масштабам последствий химической аварии* на ХОО (ПО₁) критерием является количество людей, которые могут оказаться в возможной (прогнозируемой) зоне химического заражения (табл. 3.1)

Таблица 3.1

Классификация степени потенциальной химической опасности ХОО (ПО₁) по возможному масштабу последствий химической аварии

Степень потенциальной опасности	Количество людей в возможной (прогнозируемой) зоне химического заражения, тыс. чел.
Первая	Более 75
Вторая	От 40 до 75
Третья	Менее 40
Четвертая	Зона заражения в пределах санитарно-защитной зоны

Вокруг ХОО предусматривается организация санитарно-защитной зоны (СЗЗ), в которой запрещается размещение жилых зданий, дет-

ских и лечебно-оздоровительных учреждений, а также других объектов, не относящихся к этим предприятиям. Большинство ХОО относятся к 3-му классу и имеют размеры СЗЗ не менее 300 м.

Аналогично классифицируются и территории районов, городов и субъектов Российской Федерации. Критерием для отнесения территории к той или иной степени опасности считается процент населения, проживающего на территории, подвергаемой риску химического заражения.

К первой степени опасности относят территории, на которых в зоне возможного заражения ОХВ проживает свыше 50 % населения, ко второй степени – от 30 до 50 %, к третьей степени – от 10 до 30 % и к четвертой степени – менее 10 %. Такая градация по процентам, а не по количеству людей была бы логичной и при определении $ПО_1$. Так, город Жуковский в Подмосковье относится к первой степени опасности в связи с тем, что в случае крупных аварий в Москве и Купавне он может оказаться в зоне возможного заражения ОХВ.

К ХОО с $ПО_1 = 1$ относятся крупные предприятия химической промышленности, водоочистные сооружения, расположенные в непосредственной близости или на территории крупнейших и крупных городов.

К ХОО с $ПО_1 = 2$ относятся предприятия химической, нефтехимической, пищевой и перерабатывающей промышленности, водоочистные сооружения коммунальных служб больших и средних городов, крупные железнодорожные узлы.

К ХОО с $ПО_1 = 3$ относятся небольшие предприятия пищевой и перерабатывающей промышленности (хладокомбинаты, мясокомбинаты, молокозаводы и т. п.) местного значения, водоочистные сооружения средних и малых городов и сельских населенных пунктов.

К ХОО с $ПО_1 = 4$ относятся предприятия и объекты с относительно малым количеством ОХВ (менее 0,1 т).

3.4. Степень потенциальной опасности по характеру развития возможной химической аварии

В классификации степени потенциальной опасности по характеру развития возможной химической аварии ($ПО_2$, табл. 3.2) критерием является наиболее вероятный «сценарий» развития химической аварии в зависимости от физико-химических свойств ОХВ, условий

хранения и др. Эта классификация относительна в связи с многообразием различных ОХВ, хранящихся на предприятиях.

Таблица 3.2

Классификация степени потенциальной химической опасности ХОО (ПО₂) по характеру развития возможной химической аварии

Степень потенциальной опасности	Характер развития возможной химической аварии
Первая	Образуется только первичное облако зараженного воздуха
Вторая	Пролив (разлив) ОХВ с образованием первичного и вторичного облака зараженного воздуха
Третья	Пролив (разлив) ОХВ с образованием только вторичного облака зараженного воздуха
Четвертая	Заражение территории объекта и сточных вод малолетучими ОХВ при проливе (разливе)

Большую опасность для окружающей среды и людей представляет разрушение хранилищ с ОХВ и возгорание складов с крупнотоннажными запасами твердых веществ, образующих при горении токсичные продукты. Особенно опасны разрушения крупнотоннажных хранилищ с летучими ОХВ и хранилищ, находящихся под давлением.

При полном разрушении хранилищ с ОХВ часть веществ в течение непродолжительного времени (1 – 3 мин) переходит в газообразное состояние и образует первичное облако зараженного воздуха. Количество вещества, перешедшего в первичное облако, зависит от его физико-химических свойств и условий хранения.

Так, при полном разрушении крупнотоннажных хранилищ с аммиаком под обычным атмосферным давлением в первичное облако может перейти до 3 % вещества, находящегося в хранилище, а при разрушении аналогичных хранилищ, находящихся под высоким давлением, – до 18 – 20 % вещества.

К ХОО с ПО₂ = 1 относятся предприятия, имеющие хранилища со сжатыми газами. При аварии и разрушении этих хранилищ в соответствии с Методикой прогнозирования масштабов заражения образуется только первичное облако зараженного воздуха.

К ХОО с $ПО_2 = 2$ относятся предприятия, имеющие хранилища со сжиженными газами. При аварии и разрушении этих хранилищ в соответствии с указанной выше Методикой образуются первичное и вторичное облака зараженного воздуха. Примером может служить ЧС, возникшая в результате аварии в хранилище жидкого аммиака на химическом предприятии г. Ионава (Латвия) в 1989 г. В результате этой аварии образовалось первичное облако зараженного воздуха с поражающими концентрациями паров аммиака и вторичное облако с опасными концентрациями паров, а также произошло заражение грунта и воды.

К ХОО с $ПО_2 = 3$ относятся предприятия, имеющие хранилища с ОХВ, кипящими при температуре выше окружающей среды (+ 20 °С). При аварии и разрушении этих хранилищ образуется только вторичное облако зараженного воздуха.

Такая чрезвычайная ситуация может возникнуть, например, при аварийном проливе фосгена или компонента ракетного топлива – четырехоксида азота и т. п. Данные ЧС для человека менее опасны, чем первые два, поскольку время испарения составляет от нескольких часов до нескольких суток, что достаточно для своевременной защиты населения.

К ХОО с $ПО_2 = 4$ относятся предприятия, имеющие хранилища с ОХВ, кипящими при температуре значительно выше окружающей среды, или твердыми. При авариях на них происходит заражение местности (грунта, воды) с опасными последствиями для живых организмов и растительности. Вторичное облако паров с поражающими концентрациями образуется только над зараженной территорией.

Такая чрезвычайная ситуация может возникнуть при авариях на ХОО с ОХВ типа несимметричный диметилгидразин, фенол, сероуглерод, ацетонитрил, диоксин, металлическая ртуть, соли синильной кислоты, ряд боевых отравляющих веществ и др.

По степени токсической опасности химически опасные объекты классифицируются в зависимости от класса ОХВ, находящихся на объекте. Известно, что они подразделяются на четыре класса опасности: первый – чрезвычайно опасные, второй – высокоопасные, третий – умеренно опасные, четвертый – малоопасные. Класс опасности ХОО определяется в зависимости от показателей и норм опасности, приведенных в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Классификация степени потенциальной опасности ХОО (ПО₃)
в зависимости от показателей и норм для определения класса
опасности ОХВ

Наименование показателя	Норма для определения класса опасности			
	Предельно допустимая концентрация ОХВ в воздухе рабочей зоны, мг/м ³	менее 0,1	0,1 – 1,0	1,1 – 10,0
Средняя смертельная доза при введении в желудок, мг/кг	Менее 15	15 – 150	151 – 500	Более 500
Средняя смертельная доза при нанесении на кожу, мг/кг	Менее 100	100 – 500	501 – 2500	Более 2500
Средняя смертельная концентрация в воздухе, мг/м ³	Менее 500	500 – 5000	5001 – 50 000	Более 50 000
Коэффициент возможного ингаляционного отравления (КВИО)	Более 300	300 – 30	29 – 3	Менее 3

Примечания.

1. КВИО определяется как отношение $S_{max}/LC50$.

2. Отнесение ХОО к классу опасности производят по показателю, значение которого соответствует наиболее высокому классу опасности.

К веществам чрезвычайно опасным и высокоопасным относятся соединения некоторых металлов (мышьяка, ртути, свинца, таллия, цинка и др.), карбонилы металлов (никеля, железа и др.), вещества, содержащие циангруппу, соединения фосфора, фторорганические соединения, хлоргидрины, галогены и другие соединения.

К наиболее распространенным опасным ОХВ относятся двуокись азота, аммиак, сернистый ангидрид, синильная кислота, фосген, хлор и ряд других.

По риску возникновения аварии в классификации ХОО по риску возникновения аварии (ПО₄) различают четыре степени потенциальной опасности объектов в зависимости от индивидуального риска. Это и служит критерием оценки объекта.

К ХОО с ПО₄ = 1 относятся критические объекты с $r = 1 \cdot 10^{-3}$.

К ХОО с ПО₄ = 2 относятся очень опасные объекты с $r = 1 \cdot 10^{-4}$.

К ХОО с $ПО_4 = 3$ относятся опасные объекты с $r = 1 \cdot 10^{-5}$.

К ХОО с $ПО_4 = 4$ относятся малоопасные объекты с $r = 1 \cdot 10^{-6}$.

По степени потенциальной опасности ХОО по взрыво- и пожароопасности ($ПО_5$) критерием является потенциал взрыво- и пожароопасности F (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Классификация степени потенциальной опасности ХОО
по взрыво- и пожароопасности

Степень потенциальной опасности	Потенциал взрыво- и пожароопасности объекта
1	$F > 95$
2	$65 < F < 95$
3	$0 < F < 65$
4	$F = 0$

К $ПО_5$ со степенью потенциальной опасности, равной единице, относятся объекты, у которых хотя бы один технологический элемент имеет максимальный потенциал взрыво- и пожароопасности ($F > 95$).

3.5. Общая степень потенциальной опасности химически опасных объектов

Для определения общей степени потенциальной опасности ХОО может быть использован обобщенный показатель опасности, который определяется по сумме рассмотренных выше степеней опасности элементов объекта

$$ОПО = ПО_1 + ПО_2 + ПО_3 + ПО_4 + ПО_5.$$

По значению обобщенного показателя ХОО делятся на четыре категории опасности (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Категории опасности ХОО по обобщенному показателю опасности

Категория опасности ХОО	Значение обобщенного показателя опасности
1-я (критическая)	5 – 8
2-я (чрезвычайная)	9 – 13
3-я (очень опасная)	13 – 16
4-я (опасная)	17 – 20

3.6. Примеры оценки потенциальной опасности химически опасных объектов

Задача 1. Дать характеристику объекту, имеющему следующие индексы по показателям опасности: ЗАО «Азот» – 12213, где 12213 – значения ПО₁, ПО₂, ПО₃, ПО₄, ПО₅.

Решение. ЗАО «Азот» – 12213 – объект чрезвычайно опасный, в зоне химического заражения на ХОО может оказаться более 75 тыс. человек; при аварии может образоваться первичное и вторичное облака паров ОХВ и возникнуть ЧС второго типа; на объекте есть ОХВ второго класса токсической опасности; по показанию риска объект критический; по взрыво- и пожароопасности объект относится к 3-й категории.

Задача 2. Дать характеристику объекту, имеющему следующие индексы по показателям опасности: ОАО «Пероксид» – 24411, где 24411 – значения ПО₁, ПО₂, ПО₃, ПО₄, ПО₅.

Решение. ОАО «Пероксид» – 24411 – объект чрезвычайно опасный, в зоне химического заражения на ХОО может оказаться от 40 до 75 тыс. человек; при аварии могут возникнуть ЧС четвертого типа и загрязнение территории малолетучими ОХВ; на объекте есть ОХВ четвертого класса токсической опасности; по показанию риска объект критический; по взрыво- и пожароопасности объект относится к 1-й категории.

Задача 3. Дать характеристику объекту, имеющему следующие индексы по показателям опасности: ЗАО «Синтез» – 33332, где 33332 – значения ПО₁, ПО₂, ПО₃, ПО₄, ПО₅.

Решение. ЗАО «Синтез» – 33332 – объект очень опасный. В зоне химического заражения при аварии на ХОО может оказаться менее 40 тыс. человек; при аварии образуется разлив вторичного ОХВ, и при этом может возникнуть чрезвычайная ситуация третьего типа; на объекте есть ОХВ третьего класса токсической опасности; по показанию риска объект опасный; по взрыво- и пожароопасности объект относится ко 2-й категории.

Контрольные вопросы

1. Какие объекты экономики являются химически опасными?
2. Назовите основные потенциально опасные ХОО.

3. По какому критерию классифицируются химически опасные объекты?

4. Что лежит в основе классификации химически опасных объектов?

5. Что является критерием в классификации степени потенциальной опасности по масштабам последствий химических аварий на ХОО?

6. Что служит критерием в классификации степени потенциальной опасности по характеру развития возможной аварии на ХОО?

7. Что можно считать критерием в классификации степени потенциальной опасности по степени токсической опасности аварии на ХОО?

8. Что является критерием в классификации степени потенциальной опасности по риску возникновения аварии на ХОО?

9. Назовите критерий в классификации степени потенциальной опасности по взрыво- и пожароопасности аварии на ХОО.

10. Как определяется общая степень потенциальной опасности ХОО?

4. ПАРАМЕТРЫ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА. МЕТОДЫ И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

4.1. Некоторые важные понятия молекулярной физики

В молекулярной физике количество вещества удобно выражать в молях или киломолях. 1 *моль вещества* – количество вещества в граммах, масса которого численно равна молекулярной массе. Например, масса 1 моля водорода H_2 равна 2 г/моль или $2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, а масса 1 моля метана CH_4 – 16 г/моль или $16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; 1 киломоль вещества в тысячу раз больше 1 моля, поэтому его масса в 10^3 раз больше; например, для метана масса 1 киломоля составляет 16 кг/кмоль.

В связи с тем что масса 1 моля вещества численно равна его молекулярной массе, в 1 моле любого вещества содержится одинаковое количество молекул. Оно составляет $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ молекул/моль (число Авогадро). Поэтому в газообразном состоянии 1 моль любого вещества при нормальных условиях занимает один и тот же объем, равный 22,4 л. Таким образом, объем 1 моля любого газа при $T_0 = 273$ К и $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па составляет 22,4 л/моль или $22,4 \cdot 10^{-3}$ м³/моль. Объем 1 киломоля в тысячу раз больше и равен 22,4 м³/кмоль.

Объем 1 моля газа можно определить из уравнения состояния (Клапейрона – Менделеева)

$$PV = \frac{m}{M} RT, \quad (4.1)$$

где m – масса вещества;

M – масса одного моля вещества;

$\frac{m}{M}$ – число молей вещества;

R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/моль·К).

Для 1 моля вещества ($\frac{m}{M} = 1$) объем газа при нормальных условиях составит

$$V_{\mu} = \frac{RT}{P} = \frac{8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 273 \text{ К}}{1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль},$$

где Дж = Н·м, Па = Н/м².

Плотность вещества в газообразном состоянии при нормальных условиях

$$\rho = \frac{M}{V}. \quad (4.2)$$

Если условия отличаются от нормальных, необходимо ввести поправки на температуру и давление. Для этого можно использовать объединенный газовый закон

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0V_0}{T_0} \rightarrow V = V_0 \frac{P_0T}{PT_0}. \quad (4.3)$$

Использование таких величин, как масса и объем 1 моля вещества, позволяет значительно упростить решение многих практических важных задач, когда необходимо по известной массе вещества найти его объем в газообразном состоянии, или наоборот.

Пример 4.1. Какой объем паров образуется при испарении 20 кг ацетона? Условия считать нормальными ($T = 273 \text{ К}$, $P = 101,3 \text{ кПа}$).

Решение. Воспользовавшись табл. 1 приложения, где приведены атомные массы углерода, водорода и кислорода, найдем молекулярную массу ацетона ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$).

$M = 12 \cdot 3 + 1 \cdot 6 + 16 \cdot 1 = 58$, это означает, что масса 1 кмоль ацетона равна $M_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} = 58 \text{ кг/кмоль}$, а количество киломолей испарившегося ацетона составит

$$n_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}} = \frac{m}{M_{\text{C}_3\text{H}_6\text{O}}} = \frac{20 \text{ кг}}{58 \text{ кг/кмоль}} \approx 0,35 \text{ кмоль}.$$

Тогда объем паров ацетона $V_{\text{паров}} = V_{\mu} \cdot n$, где V_{μ} – объем 1 кмоль вещества при нормальных условиях, $V_{\text{паров}} = 22,4 \text{ м}^3 \text{ кмоль} \cdot 0,35 \text{ кмоль} = 7,8 \text{ м}^3$.

Пример 4.2. В баллоне объемом 20 л находится кислород под давлением 150 атм. Найти массу этого кислорода. Температуру принять равной нормальной ($T = 273 \text{ К}$).

Решение. Найдем объем кислорода при нормальных условиях. Согласно объединенному газовому закону

$$V_0 = V \frac{P_0T}{PT_0},$$

по условию задачи $T = T_0 = 273 \text{ К}$, $P = 150 P_0$.

Тогда $V_0 = V \cdot 150 = 40 \text{ л} \cdot 150 = 6000 \text{ л} = 6 \text{ м}^3$ (при н.у.).

Масса кислорода, находящегося в баллоне, составит

$$m = \frac{V_0}{V_{\mu}} M_{\text{O}_2},$$

где $V_{\mu} = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$, $M_{\text{O}_2} = 32 \text{ кг/кмоль}$ (табл. 1 и 2 приложения).

$$m = \frac{6 \text{ м}^3}{22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}} 32 \text{ кг/кмоль} \approx 8,6 \text{ кг}.$$

4.2. Материальный баланс процессов горения

4.2.1. Уравнение материального баланса

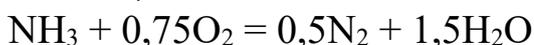
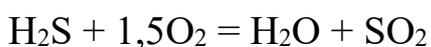
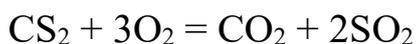
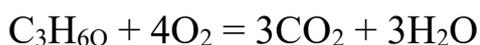
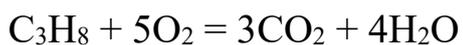
При горении веществ в воздухе происходит быстрая химическая реакция между горючим веществом и кислородом воздуха с интенсивным тепловыделением. В результате этой реакции образуются в основном окислы элементов, входящих в состав горючего вещества. При сгорании углеводородов, состоящих из атомов С и Н, образуется CO_2 (двуокись углерода) и H_2O (вода).

При неполном сгорании наряду с ними образуются CO (окись углерода) и $\text{C}_{\text{п(тверд)}}$ (углерод) в виде сажи. При записи уравнения горения и составлении материального баланса, как правило, имеют в виду только продукты полного окисления CO_2 и H_2O . Если в составе горючего вещества есть сера S, то при сгорании образуется SO_2 .

Азот N, входящий в состав горючего вещества, при горении в воздухе не окисляется, а выделяется в виде свободного азота N_2 . Объясняется это тем, что при горении в воздухе температура горения относительно невысокая (1500 – 2000 К) и при такой температуре окислы азота не образуются. Примеры реакций горения:

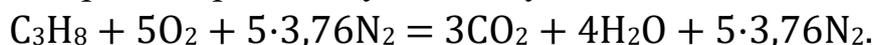
- горение пропана $\text{C}_3\text{H}_8 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- горение ацетона $\text{C}_3\text{H}_6\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
- горение сероуглерода $\text{CS}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{SO}_2$
- горение сероводорода $\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$
- горение аммиака $\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Согласно закону сохранения массы количество атомов каждого элемента в левой и правой частях химического уравнения должно быть одинаковым. Для того чтобы уравнивать обе части уравнения, рекомендуется сначала расставить коэффициенты перед окислами в правой части, чтобы уравнивать число атомов элементов горючего вещества (С, Н, S, N ...). Затем, подсчитав количество атомов кислорода в правой части уравнения, поставить коэффициенты перед кислородом в левой части уравнения. При этом необходимо учесть кислород, который может входить в состав молекулы горючего вещества (например, как это имеет место в ацетоне $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ или этиловым спирте $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$). С учетом вышесказанного запишем уравнения реакций горения вышеприведенных веществ:



Необходимо помнить, что записанные уравнения химических реакций горения являются брутто-уравнениями, которые показывают только начальное и конечное состояние системы, т. е. какие исходные вещества вступают в реакцию и какие продукты при этом образуются. Они не отражают механизма химического взаимодействия при горении, который достаточно сложен и протекает через ряд промежуточных стадий с учетом атомов и радикалов.

Уравнение материального баланса процесса горения отличается от уравнения химической реакции тем, что в него для удобства расчетов включают азот, содержащийся в воздухе и не участвующий в химическом превращении. Поскольку воздух состоит из 21 % (об.) кислорода и 79 % (об.) азота, т. е. в нем на 1 моль кислорода приходится $79/21 = 3,76$ молей азота, в уравнении материального баланса перед азотом ставят коэффициент 3,76. Например, уравнение материального баланса для горения пропана будет следующее:

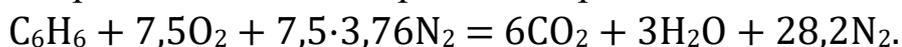


Коэффициент, который записывают перед O_2 (в данном случае 5), необходимо повторить и перед N_2 , так как азот и кислород в воздухе неразделимы.

4.2.2. Объем воздуха, необходимый для горения, и объем продуктов горения

Уравнение материального баланса позволяет рассчитывать количество воздуха, необходимое для горения любого вещества, и количество образующихся продуктов горения.

Минимальное количество воздуха, необходимое для полного сгорания единицы количества (кг, кмоль, м^3) горючего вещества, называют **теоретическим количеством воздуха** $V_{\text{в}}^0$. Рассмотрим для примера материальный баланс процесса горения бензола в воздухе



Из этого уравнения видно, что для полного сгорания 1 кмоль бензола требуется $(7,5 + 7,5 \cdot 3,76)$ кмоль воздуха, который состоит из

7,5 кмольей O_2 и $7,5 \cdot 3,76$ кмольей не принимающего участия в горении N_2 . При сгорании 1 кмоль бензола образуется 6 кмольей CO_2 , 3 кмольей H_2O и остается не участвовавший в химическом превращении $7,5 \cdot 3,76 = 28,2$ кмольей N_2 . В общем виде формула для расчета количества воздуха

$$V_B^0 = \frac{n_{O_2} + n_{N_2}}{n_r}, \quad (4.4)$$

где n_{O_2} , n_{N_2} , n_r – число киломолей кислорода, азота и горючего вещества в уравнении материального баланса, киломоль.

Формула для расчета объемов продуктов горения

$$V_{CO_2} = \frac{n_{CO_2}}{n_r}, \quad V_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{n_r} \quad \text{и} \quad V_{N_2}^0 = \frac{n_{N_2}}{n_r}, \quad (4.5)$$

где n_{CO_2} , n_{H_2O} , n_{N_2} – количество киломолей веществ в правой части уравнения материального баланса;

$V_{N_2}^0$ – объем азота из воздуха, участвовавшего в горении, кмоль/кмоль.

Общий объем продуктов горения определяется по формуле

$$V_{\text{пр}}^0 = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}^0. \quad (4.6)$$

Горючая газоздушная смесь, соответствующая уравнению материального баланса, называется **стехиометрической**. В такой смеси нет ничего лишнего, горючее и окислитель находятся в пропорции, обеспечивающей полное ее сгорание.

Для вышеприведенного примера стехиометрическая смесь состоит из 1 объема бензола (пары в газообразном состоянии), 7,5 объемов кислорода и $7,5 \cdot 3,76$ объемов азота. При сгорании такой смеси в продуктах горения будут только CO_2 , H_2O и N_2 в объемах, соответствующих правой части уравнения.

При горении расход воздуха может отличаться от теоретически необходимого. Отношение количества воздуха, участвовавшего в горении, к теоретически необходимому называется **коэффициентом избытка воздуха** $\alpha = \frac{V_B}{V_B^0}$.

Действительный расход воздуха на единицу горючего записывается как $V_B = \alpha V_B^0$. Разность между действительным и теоретически необходимым количеством воздуха называется **избытком воздуха**

$$\Delta V = V_B - V_B^0 \quad \text{или} \quad \Delta V_B = V_B^0 (\alpha - 1). \quad (4.7)$$

Для стехиометрической смеси $\alpha = 1$ и $\Delta V_B = 0$.

Если горение происходит с избытком воздуха ($\alpha > 1$), то азота в продуктах горения будет больше (добавится азот из избытка воздуха)

$$V_N = V_N^0 + 0,79\Delta V_B, \quad (4.8)$$

и в продуктах горения появится кислород

$$V_{O_2} = 0,21\Delta V_B. \quad (4.9)$$

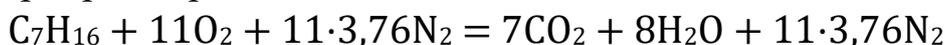
В этом случае полный объем продуктов горения

$$V_{\text{пг}} = V_{\text{пг}}^0 + \Delta V_B \text{ или} \quad (4.10)$$

$$V_{\text{пг}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}.$$

Для газообразных горючих веществ расчет объемов воздуха и продуктов горения чаще всего проводят в $\text{м}^3/\text{м}^3$. Так как 1 кмоль любого газа в одинаковых условиях занимает один и тот же объем (при нормальных условиях $22,4 \text{ м}^3$), то объем, рассчитанный в $\text{м}^3/\text{м}^3$, численно будет таким же, как и в кмоль/кмоль.

Если горючее вещество находится в конденсированном состоянии (жидком или твердом), то, как правило, расчеты объемов воздуха и продуктов горения проводят в $\text{м}^3/\text{кг}$. Для этого кмоль воздуха или продукта горения переводят в кубический метр, умножая на объем одного кмоль газа ($22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$), а кмоль горючего переводят в килограммы, умножая на массу одного кмоль горючего (M_r , $\text{кг}/\text{кмоль}$). Например, при сгорании 1 кг гептана



требуется воздуха

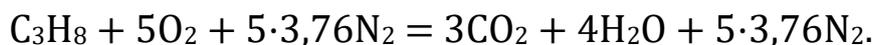
$$V_B^0 = \frac{(n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2})22,4}{n_r M_r} = \frac{(11 + 11 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 100} = 11,7 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\text{образуется } V_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2} 22,4}{n_r M_r} = \frac{7 \cdot 22,4}{1 \cdot 100} = 1,57 \text{ м}^3/\text{кг}$$

и далее по химическому уравнению.

Пример 4.3. Определить, какое количество воздуха потребуется для сгорания 1 м^3 пропана и какое количество продуктов сгорания при этом образуется. Сгорание происходит при $\alpha = 1$ (стехиометрическая смесь; температуру и давление считать нормальными).

Решение. Запишем уравнение материального баланса горения пропана



Объем воздуха, необходимый для горения:

$$V_B^0 = \frac{(n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2})}{n_r} = \frac{5 + 5 \cdot 3,76}{1} = 23,8 \text{ кмоль/кмоль или } \text{м}^3/\text{м}^3.$$

Объем продуктов горения

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{n_{\text{CO}_2}}{n_{\text{Г}}} = \frac{3}{1} = 3 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{n_{\text{H}_2\text{O}}}{n_{\text{Г}}} = \frac{4}{1} = 4 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3;$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = \frac{n_{\text{N}_2}}{n_{\text{Г}}} = \frac{5 \cdot 3,76}{1} = 18,8 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3.$$

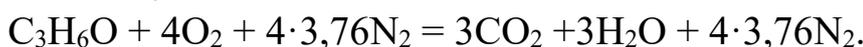
Так как $\alpha = 1$, избыток воздуха $\Delta V_{\text{В}} = 0$, тогда полный объем продуктов горения

$$V_{\text{ПГ}}^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0 = 3 + 4 + 18,8 = 25,8 \text{ кмоль/кмоль или м}^3/\text{м}^3.$$

Таким образом, для сгорания 1 м³ пропана требуется 23,8 м³ воздуха, объем продуктов сгорания при этом составит 25,8 м³ (при н.у.).

Пример 4.4. Определить объем воздуха и продуктов горения при нормальных условиях, если при пожаре на складе сгорело 1000 кг ацетона, а горение протекало при $\alpha = 2$.

Решение. Запишем уравнение материального баланса горения ацетона в воздухе



Объем воздуха, необходимого для 1 кг ацетона:

$$V_{\text{В}}^0 = \frac{(n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2})22,4}{n_{\text{Г}}M_{\text{Г}}}.$$

Учитывая, что масса одного киломоля ацетона составляет 58 кг/моль, получим

$$V_{\text{В}}^0 = \frac{(4 + 4 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 58} = 7,4 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Действительно, объем воздуха с учетом коэффициента избытка воздуха $\alpha = 2$

$$\Delta V_{\text{В}} = \alpha V_{\text{В}}^0 = 2 \cdot 7,4 = 14,8 \text{ м}^3/\text{кг},$$

а избыток воздуха $\Delta V_{\text{В}} = V_{\text{В}} - V_0 = V_{\text{В}}^0(\alpha - 1) = 7,4 \text{ м}^3/\text{кг}.$

Объем продуктов сгорания

$$V_{\text{ПГ}}^0 = \frac{(n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2})22,4}{n_{\text{Г}}M_{\text{Г}}} = \frac{(3 + 3 + 4 \cdot 3,76)22,4}{1 \cdot 58} = \frac{8,1 \text{ м}^3}{\text{кг}}.$$

С учетом избытка воздуха полный объем продуктов горения

$$V_{\text{ПГ}}^0 = V_{\text{ПГ}}^0 + \Delta V_{\text{В}} = 8,1 + 7,4 = 15,5 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

При сгорании 1000 кг ацетона объем воздуха при нормальных условиях составит $14,8 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 1000 \text{ кг} = 14\,800 \text{ м}^3$, а объем продуктов горения $15,5 \text{ м}^3/\text{кг} \cdot 1000 \text{ кг} = 15\,500 \text{ м}^3$.

Примечание. Если в процессе горения были заданы другие значения температуры и давления, то объем продуктов горения рассчитывается с учетом объема, который занимает один кмоль газа при этих условиях

$$V = \frac{22,4 P_0 T}{T_0 P},$$

где $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$; $T_0 = 273,15 \text{ К}$; T и P – заданные температура и давление.

4.3. Тепловой баланс процессов горения

4.3.1. Теплота сгорания вещества

В основе процесса горения лежит химическая реакция горючего вещества с окислителем, которая происходит с интенсивным тепловыделением. Количество теплоты, выделяющееся при полном сгорании единицы количества горючего вещества (моль, кг или м^3), называют низшей теплотой сгорания $Q_{\text{н}}$.

Если горючее вещество имеет в своем состав водород, то при его сгорании образуется вода в газообразном состоянии, которая, охлаждаясь, будет конденсироваться. Так как в процессе конденсации паров выделяется тепло, то общее количество теплоты, полученное при сгорании вещества, будет больше на эту величину. Напомним, что количество теплоты, выделяющееся при конденсации паров, равно количеству теплоты, затраченному на парообразование. Тогда

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{н}} + r, \quad (4.11)$$

где $Q_{\text{в}}$ – высшая теплота сгорания вещества;

$Q_{\text{н}}$ – низшая теплота сгорания вещества;

r – удельная теплота парообразования воды.

При расчетах температуры горения пользуются величиной $Q_{\text{н}}$, так как при температуре горения вода находится в газообразном состоянии. Значения низшей теплоты сгорания вещества (тепловой эффект химической реакции) приводятся в справочной литературе. Эта величина может быть рассчитана по закону Гесса, который говорит о том,

что тепловой эффект химической реакции равен разности сумм теплоты образования продуктов реакции и теплоты образования исходных веществ

$$Q_{\text{н}} = \left(\sum \Delta H_{f_i}^0 n_i \right)_{\text{прод}} - \left(\sum \Delta H_{f_i}^0 n_i \right)_{\text{исх}}, \quad (4.12)$$

где $\Delta H_{f_i}^0$ – теплота образования i -го вещества, n_i – количество молей i -го вещества.

Напомним из курса химии, что теплота образования сложного вещества равна количеству теплоты, выделившейся при его образовании из простых веществ. Теплота образования простого вещества (вещества, молекулы которого состоят из атомов одного элемента, например, N_2 , O_2 , H_2 , S , C ...) принимается равной нулю. Теплота образования некоторых горючих веществ приведена в табл. 2 и 3 приложения. При сгорании метана $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Низшая теплота сгорания согласно закону Гесса равна

$$Q_{\text{н}} = \Delta H_{f_{\text{CO}_2}}^0 n_{\text{CO}_2} + \Delta H_{f_{\text{H}_2\text{O}}}^0 n_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{f_{\text{CH}_4}}^0 n_{\text{CH}_4} - \Delta H_{f_{\text{O}_2}}^0 n_{\text{O}_2}. \quad (4.13)$$

Учитывая, что кислород – простое вещество и для него $\Delta H_{f_{\text{O}_2}}^0 = 0$,

$$Q_{\text{н}} = \Delta H_{f_{\text{CO}_2}}^0 n_{\text{CO}_2} + \Delta H_{f_{\text{H}_2\text{O}}}^0 n_{\text{H}_2\text{O}} - \Delta H_{f_{\text{CH}_4}}^0 n_{\text{CH}_4}. \quad (4.14)$$

Подставляя значения теплоты образования CO_2 , H_2O и CH_4 из табл. 2 приложения, окончательно получим

$$Q_{\text{в}} = 396,6 \cdot 1 + 242,2 \cdot 2 - 75 = 806 \text{ кДж/моль.}$$

4.3.2. Температура горения

Под температурой горения понимают максимальную температуру, до которой нагреваются продукты горения. Принято различать адиабатическую температуру горения, рассчитываемую без учета потерь тепла в окружающее пространство, и действительную температуру горения, учитывающую эти потери.

Для расчета температуры горения составим уравнение теплового баланса, считая, что выделившееся в результате сгорания тепло нагревает продукты горения (CO_2 , H_2O , N_2 ...) от начальной температуры T_0 до температуры $T_{\text{г}}$, увеличивая их теплосодержание

$$Q_{\text{н}}(1 - \eta) = \sum [H_{\text{пги}}(T_{\text{г}}) - H_{\text{пги}}(T_0)] V_{\text{пги}}, \quad (4.15)$$

где η – коэффициент теплопотерь (доля потерь тепла на излучение);
 $H_{\text{пг}i}(T_{\text{Г}})$ и $H_{\text{пг}i}(T_0)$ – значения теплосодержания (энтальпия)
 i -го продукта горения при температуре горения и начальной
температуре;

$V_{\text{пг}i}$ – объем i -го продукта горения.

Если теплосодержание продуктов горения при $T = 273$ К принять равным нулю, то

$$Q_{\text{н}}(1 - \eta) = \sum H_{\text{пг}i}(T_{\text{Г}})V_{\text{пг}i}. \quad (4.16)$$

Задача состоит в том, чтобы по известной зависимости теплосодержания газов от температуры методом последовательных приближений найти температуру, при которой будет справедливо это равенство.

Напомним, что адиабатическим называют процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, поэтому температуру горения, рассчитанную при условии отсутствия теплопотерь, называют адиабатической. Таким образом, для адиабатического процесса, так как $\eta = 0$,

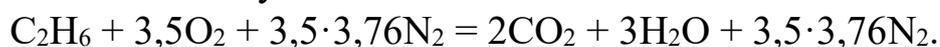
$$Q_{\text{н}} = \sum H_{\text{пг}i}(T_{\text{Г}})V_{\text{пг}i}. \quad (4.17)$$

Температура горения зависит от концентрации горючего в горючей смеси. Если горение происходит с избытком воздуха, т. е. при $\alpha < 1$, то выделившееся в результате сгорания тепло частично затрачивается на нагрев этого лишнего воздуха. В горючей смеси с $\alpha < 1$ из-за недостатка воздуха полное сгорание горючего вещества произойти не может, поэтому и тепловыделение в такой смеси будет неполным. Из этого можно сделать вывод, что максимальная температура горения будет при сгорании стехиометрической смеси, т. е. при $\alpha = 1$.

Адиабатическую температуру горения, как правило, рассчитывают для стехиометрической смеси, т. е. при $\alpha = 1$.

Пример 4.5. Найти адиабатическую температуру горения стехиометрической смеси этана с воздухом, начальная температура горючей смеси $T_0 = 273$ К.

Решение. Адиабатическую температуру горения вещества находят при условии отсутствия теплопотерь ($\eta = 0$) для стехиометрической смеси горючего с воздухом, т. е. при $\alpha = 1$. Запишем уравнение горения этана в воздухе



Объем продуктов горения составляет

$$V_{\text{CO}_2} = 2 \text{ моль/моль}; V_{\text{H}_2\text{O}} = 3 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}; V_{\text{N}_2}^0 = 3,5 \cdot 3,76 = 13,2 \text{ моль/моль}.$$

Избыток воздуха $\Delta V_{\text{в}} = 0$, так как $\alpha = 1$.

Низшую теплоту сгорания этана рассчитываем по закону Гесса, взяв значения теплоты образования веществ из табл. 2 приложения.

$$Q_{\text{н}} = 2\Delta H_{f\text{CO}_2}^0 + 3\Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}^0 - \Delta H_{f\text{C}_2\text{H}_6}^0 = 2 \cdot 396,6 + 3 \cdot 242,2 - 88,4 = 1431,4 \text{ кДж/моль}.$$

Так как теплопотери отсутствуют, то все выделившееся тепло идет на нагревание продуктов горения. Среднее теплосодержание продуктов сгорания будет составлять

$$H_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\sum V_{\text{пг}i}} = \frac{Q_{\text{н}}}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0} = \frac{1431,4}{2 + 3 + 13,2} = 78,6 \text{ кДж/моль}.$$

Воспользовавшись зависимостью теплосодержания газов от температуры (табл. 4 приложения), можно установить, какой температуре соответствует такое теплосодержание. Лучше всего это сделать, ориентируясь на азот, так как его больше всего в продуктах горения. Из табл. 4 приложения видно, что при температуре 2300 °С теплосодержание азота 77,8 кДж/моль. Уточним, сколько потребовалось бы тепла, чтобы нагреть продукты горения до такой температуры. При $T_1 = 2300 \text{ °С}$

$$Q_1 = H_{\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2} + H_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + H_{\text{N}_2} V_{\text{N}_2}^0.$$

Подставляя численные значения теплосодержаний этих газов из табл. 4 приложения, получим

$$Q_1 = 126,9 \cdot 2 + 104,2 \cdot 3 + 77,8 \cdot 13,2 = 1593 \text{ кДж/моль}.$$

Но это больше, чем выделилось тепла в результате реакции горения $Q_1 > Q_{\text{н}}$.

Поэтому можно сказать, что температура горения меньше, чем 2300 °С.

Определим, сколько тепла потребуется для нагревания продуктов горения до 2200 °С.

При $T_2 = 2200 \text{ °С}$

$$Q_2 = 120,8 \cdot 2 + 98,8 \cdot 3 + 74,1 \cdot 13,2 = 1516 \text{ кДж/моль}.$$

Но и $Q_2 > Q_{\text{н}}$, значит, $T_{\text{г}} < 2200 \text{ °С}$.

Сделаем следующий шаг (в этом и состоит суть метода последовательных приближений), выберем $T_3 < 2100 \text{ °С}$, при этой температуре

$$Q_3 = 114,7 \cdot 2 + 93,4 \cdot 3 + 70,4 \cdot 13,2 = 1439 \text{ кДж/моль}.$$

Это совсем немного больше, чем Q_n .

При $T_4 = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_4 = 108,6 \cdot 2 + 88,1 \cdot 3 + 66,8 \cdot 13,2 = 1363 \text{ кДж/моль.}$$

Q_4 уже меньше, чем Q_n , из этого можно сделать вывод, что температура горения имеет значение между 2000 и 2100 $^\circ\text{C}$. Уточним эту температуру линейной интерполяцией между двумя этими ближайшими значениями

$$T_{\Gamma}^{\text{ад}} = T_4 + \frac{T_3 - T_4}{Q_3 - Q_4} (Q_n - Q_4) = 2000 + \frac{2100 - 2000}{1439 + 1363} (1431 + 1363) = 2090 \text{ }^\circ\text{C} = 2363 \text{ К;}$$

$$T_{\Gamma}^{\text{ад}} = T_4 + \frac{T_3 - T_4}{Q_3 - Q_4} (Q_n - Q_4) = 2000 + \frac{2100 - 2000}{1439 + 1363} (1431 + 1363) = 2090 \text{ }^\circ\text{C} = 2363 \text{ К.}$$

Действительную температуру горения рассчитывают с учетом теплопотерь для любого заданного состава горючей смеси тем же методом последовательных приближений.

Для приближенных расчетов действительной температуры горения можно использовать формулу

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_n (1 - \eta)}{\sum C_{\text{пр}i} V_{\text{пр}i}}, \quad (4.18)$$

где $C_{\text{пр}i}$ – среднее значение теплоемкости i -го продукта горения при постоянном давлении в интервале температур от 273 К до T_{Γ} , которая принята равной 1500 К.

Чем больше полученное значение T_{Γ} отличается от 1500 К, тем большая погрешность вносится в ее определение. Средние значения теплоемкости продуктов горения при постоянном давлении в температурном интервале 273 – 1500 К приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Удельные теплоемкости продуктов горения

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Удельная	Теплоемкость c_p
			кДж/(м ³ ·К)	кДж/(моль·К)
1	Азот	N ₂	1,41	3,8·10 ⁻²
2	Вода (пар)	H ₂ O	1,78	3,98·10 ⁻²
3	Воздух	O ₂ + 3,76N ₂	1,44	3,23·10 ⁻²
4	Диоксид серы	SO ₂	2,28	5,11·10 ⁻²
5	Диоксид углерода	CO ₂	2,27	5,08·10 ⁻²
6	Оксид углерода	CO	1,5	3,37·10 ⁻²

4.3.3. Температура взрыва

Принципиальное различие между горением и взрывом заключается в скорости процесса. При взрыве химическое превращение происходит настолько быстро, что все выделившееся тепло остается в системе, а образовавшиеся продукты не успевают расшириться, т. е. процесс взрыва является адиабатическим и изохорным ($V = \text{const}$). Количество теплоты, выделившееся при взрыве, примерно равно низшей теплоте сгорания вещества $Q_{\text{взр}} \approx Q_{\text{н}}$. Температура взрыва значительно выше адиабатической температуры горения, так как при горении часть тепла, выделившегося при химическом превращении, затрачивается на совершение работы расширения газа, а при взрыве все выделившееся тепло расходуется только на увеличение внутренней энергии системы. Учитывая, что $Q_{\text{взр}} \approx Q_{\text{н}}$, а изменение энтальпии (теплосодержания) продуктов реакции происходит лишь в результате изменения внутренней энергии $dH = dU + pdV = dU$ при $dV = 0$, уравнение теплового баланса для взрыва можно записать в следующем виде

$$Q_{\text{н}} = \sum [U_{\text{пг}i}(T_{\text{взр}}) - U_{\text{пг}i}(T_0)]V_{\text{пг}i}, \quad (4.19)$$

где $U_{\text{пг}i}(T_{\text{взр}})$ и $U_{\text{пг}i}(T_0)$ – значения внутренней энергии i -го продукта взрыва (горения) при температуре взрыва и начальной температуре.

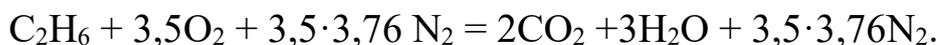
Если для удобства расчетов принять, что внутренняя энергия газов при $T = 273$ К равна нулю, то полная внутренняя энергия продуктов взрыва при температуре взрыва будет равна количеству теплоты, выделившейся в результате химической реакции

$$Q_{\text{н}} = \sum U_{\text{пг}i}(T_{\text{взр}})V_{\text{пг}i}. \quad (4.20)$$

Температуру взрыва находят методом последовательных приближений так же, как адиабатическую температуру горения (пример 4.5). Только при расчетах вместо зависимости теплосодержания от температуры используют зависимость внутренней энергии от температуры (табл. 5 приложения).

Пример 4.6. Определить температуру взрыва газовой стехиометрической смеси этана с воздухом. Начальная температура горючей смеси $T_0 = 273$ К.

Р е ш е н и е. Рекомендуются сравнить с решением примера 4.5. Температуру взрыва находят при условии отсутствия теплопотерь ($\eta = 0$). Запишем уравнение химического превращения при взрыве (аналогично уравнению горения)



Объем продуктов взрыва составляет $V_{\text{CO}_2} = 2$ моль/моль; $V_{\text{H}_2\text{O}} = 3$ моль/моль; $V_{\text{N}_2}^0 = 3,5 \cdot 3,76 = 13,2 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}$. Избыток воздуха $\Delta V_{\text{в}} = 0$, так как смесь стехиометрическая ($\alpha = 1$).

Низшую теплоту сгорания этана рассчитываем по закону Гесса, взяв значение теплоты образования вещества из табл. 3 приложения.

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}} &= 2\Delta H_{f\text{CO}_2}^0 + 3\Delta H_{f\text{H}_2\text{O}}^0 - \Delta H_{f\text{C}_2\text{H}_6}^0 = \\ &= 2 \cdot 396,6 + 3 \cdot 242,2 - 88,4 = 1431, \text{ кДж/моль.} \end{aligned}$$

Так как процесс взрыва адиабатно-изохорный (теплопотери отсутствуют и нагревание продуктов происходит без расширения газовой смеси), все выделившееся тепло расходуется на увеличение внутренней энергии системы. Среднее значение внутренней энергии продуктов взрыва составит

$$U_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{н}}}{\sum V_{\text{пр}i}} = \frac{Q_{\text{н}}}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0} = \frac{1431}{2 + 3 + 13,2} = 78,6 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}.$$

Воспользовавшись зависимостью внутренней энергии газов от температуры (см. табл. 4 приложения), можно установить, какой температуре соответствует такое значение внутренней энергии. Сделаем это по азоту, так как его больше всего в продуктах взрыва. Из табл. 4 приложения следует, что при температуре 2900 К внутренняя энергия 1 моля азота составляет 76,4 кДж/моль. Проверим расчетом, какое количество тепла требуется для того, чтобы продукты взрыва нагреть до этой температуры.

При $T_1 = 2900$ °С

$$Q_1 = U_{\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2} + U_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + U_{\text{N}_2} V_{\text{N}_2}^0,$$

Подставляя численные значения внутренней энергии для этих газов из табл. 5 приложения, получим

$$Q_1 = 139,7 \cdot 2 + 111,7 \cdot 3 + 76,4 \cdot 13,2 = 1623 \text{ кДж/ моль.}$$

Это значительно больше той энергии Q_n , которая выделилась при взрыве. Поэтому выберем следующее более низкое значение температуры $T_2 = 2700$ °С и определим, какое количество тепла при этой температуре будут содержать продукты взрыва

$$Q_2 = 128,9 \cdot 2 + 102,4 \cdot 3 + 70,2 \cdot 13,2 = 1491,6 \text{ кДж/моль.}$$

Это тоже больше, чем количество тепла, выделившегося при взрыве ($Q_2 > Q_n$), и означает, что температура взрыва ниже этого значения. Рассчитаем, какое количество тепла содержат продукты взрыва при температуре $T_3 = 2600$ °С.

$$Q_3 = 123,7 \cdot 2 + 97,8 \cdot 3 + 67,4 \cdot 13,2 = 1430,5 \text{ кДж/моль.}$$

Это значение уже меньше, чем Q_n , на этом основании можно сделать вывод, что температура взрыва этановоздушной смеси находится между значениями $T_3 = 2600$ °С и $T_2 = 2700$ °С. Уточним значение температуры взрыва методом линейной интерполяции

$$\begin{aligned} T_{\text{взр}} &= T_3 + \frac{T_2 - T_3}{Q_2 - Q_3} (Q_n - Q_3) = \\ &= 2600 + \frac{2700 - 2600}{1491 - 1430} (1431 - 1430) = 2602 \text{ °С} = 2875 \text{ К.} \end{aligned}$$

Если сравнить полученное значение температуры взрыва с адиабатической температурой горения (см. ответ в примере 4.5), можно прийти к выводу, что температура взрыва примерно на 500 К выше адиабатической температуры горения. Таким образом, химическое превращение, протекающее в форме взрыва (изохорно-адиабатический процесс), происходит со значительно большим разогревом.

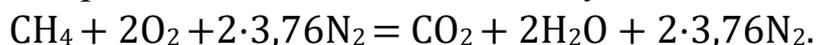
4.4. Газовоздушные горючие смеси

4.1.1. Концентрационные пределы распространения пламени (КПР) и стехиометрическая концентрация

Газовая смесь горючего с окислителем способна воспламеняться и распространять пламя только при определенных концентрациях горючего. Минимальная концентрация горючего, при которой смесь способна воспламеняться и распространять пламя, называется нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПР), а максимальная концентрация горючего – верхним концентрационным пределом распространения пламени (ВКПР).

При концентрациях горючего ниже НКПР и выше ВКПР его смеси с воздухом негорючи. Например, для метана CH_4 концентрационные пределы распространения пламени составляют НКПР – 5 об. %, а ВКПР – 15 об. % (табл. 5 приложения), для аммиака NH_3 НКПР – 15 об. %, а ВКПР – 28 об. %. Скорость распространения пламени и его температура минимальны при концентрациях горючего, равных НКПР и ВКПР.

Максимальные значения скорости и температуры пламени, как правило, имеют смеси стехиометрического состава. Поэтому эти смеси наиболее пожаро- и взрывоопасны. Концентрацию горючего в стехиометрической смеси рассчитывают по уравнению материального баланса процесса горения. Например, из уравнения горения видно, что стехиометрическая смесь метана с воздухом



Левая часть уравнения представляет собой стехиометрическую смесь, которая содержит 1 моль метана, 2 моля кислорода и $2 \cdot 3,76$ моля азота. Концентрация горючего в такой смеси

$$\varphi_{\text{стех}} = \frac{n_{\text{CH}_4} \cdot 100}{n_{\text{CH}_4} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 2 + 2 \cdot 3,76} = 9,52 \%. \quad (4.21)$$

Для некоторых газов стехиометрические концентрации приведены в табл. 5 приложения. Значения концентрационных пределов распространения пламени, приведенные в справочной литературе, установлены экспериментально. В настоящем пособии для некоторых веществ они приведены в табл. 5 приложения.

4.4.2. Расчет КПР по аппроксимационной формуле

Значения как нижнего, так и верхнего концентрационного предела распространения пламени (КПР) можно рассчитать по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{\text{н(в)}} = \frac{100}{an + b}, \quad (4.22)$$

где n – число молей кислорода, необходимого для полного сгорания одного моля горючего вещества, находят из уравнения реакции горения (стехиометрический коэффициент при кислороде);

a и b – константы, имеющие определенные значения для нижнего и верхнего пределов в зависимости от значения n , приведены в табл. 4.2.

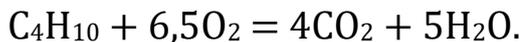
Таблица 4.2

Величины a и b для расчета КПР

Область применения	a	b
Для вычисления нижнего предела	8,684	4,679
Для вычисления верхнего предела		
при $n < 7,5$	1,550	0,560
при $n > 7,5$	0,768	6,554

Пример 4.7. Рассчитать КПР бутана в воздухе. Расчет провести по аппроксимационной формуле.

Решение. Для расчета необходимо знать число молей кислорода, необходимое для полного сгорания 1 моля бутана. Запишем уравнение горения бутана



Из уравнения видно, что $n = 6,5$.

Рассчитываем нижний концентрационный предел распространения пламени по аппроксимационной формуле, воспользовавшись значениями a и b из табл. 4.2:

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{an + b} = \frac{100}{8,684 \cdot 6,5 + 4,679} = 1,64 \%$$

Экспериментальные значения КПР, приводимые в справочной литературе, составляют 1,86 и 8,41 %. Сравнивая их с расчетными, убеждаемся, что для бутана расхождение расчетных и экспериментальных данных небольшое.

4.4.3. Зависимость КПР от концентрации флегматизатора

Концентрационная область распространения пламени горючей смеси сужается при введении негорючих компонентов. Изменение концентрационных пределов зависит от природы и концентрации негорючего вещества, используемого в качестве флегматизатора.

Чаще всего в качестве флегматизаторов используют нейтральные газы (не реагирующие в пламени), такие как углекислый газ CO_2 , азот N_2 , водяной пар H_2O . При увеличении концентрации флегматизатора в горючей смеси верхний концентрационный предел уменьшается, а нижний, как правило, незначительно увеличивается. При некоторой определенной для каждого флегматизатора концентрации нижний и

верхний концентрационные пределы смыкаются (рис. 4.1). Эта точка называется экстремальной точкой области распространения пламени, или точкой флегматизации.

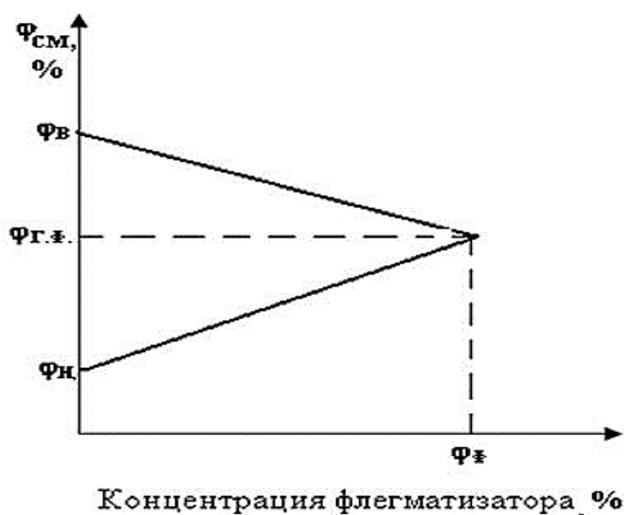


Рис. 4.1. Зависимость концентрационных пределов распространения пламени от концентрации флегматизатора в газовой смеси

Концентрация флегматизатора, при которой происходит смыкание нижнего и верхнего концентрационных пределов, называется **минимальной флегматизирующей концентрацией (МФК)**. По сути, это минимальное количество флегматизатора, которое необходимо ввести в газоздушную смесь стехиометрического состава, чтобы сделать ее негорючей. Речь идет о стехиометрической смеси, так как она наиболее пожаро- и взрывоопасна.

Минимальную флегматизирующую концентрацию можно рассчитать, если исходить из того, что адиабатическая температура горения смеси стехиометрического состава не может быть меньше 1500 К.

Если за предельную адиабатическую температуру горения принять температуру, равную 1500 К, то достаточно точно расчет МФК можно провести по уравнению (4.18), которое для этого случая запишется так:

$$T_{\Gamma} = T_0 + \frac{Q_{\text{H}}}{\sum C_{p_i} V_{ngi} + C_{p\phi} V_{\phi}}, \quad (4.23)$$

где $C_{p\phi}$ – среднее значение теплоемкости флегматизатора при постоянном давлении для температурного интервала 273 – 1500 К;

V_{ϕ} – количество флегматизатора в исходной горючей смеси.

Тогда из (4.23) получим

$$V_{\phi} = \frac{Q_H - (T_{\Gamma} - T_0) \sum C_{p_{\text{пр}i}} V_{\text{пр}i}}{(T_{\Gamma} - T_0) C_{p_{\phi}}}. \quad (4.24)$$

Если в уравнение (4.24) подставить значение $T_{\Gamma} = 1500$ К, то получим количество флегматизатора в исходной горючей смеси, при котором достигается эта предельная температура горения

$$V_{\text{мфк}} = \frac{Q_H - (1500 - T_0) \sum C_{p_{\text{пр}i}} V_{\text{пр}i}}{(1500 - T_0) C_{p_{\phi}}}, \quad (4.25)$$

где $T_0 = 273$ К.

А минимальная флегматизирующая концентрация составит, % об.,

$$\varphi_{\text{мфк}} = \frac{V_{\phi} 100}{V_{\Gamma} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} \quad (4.26)$$

$$\text{или } \varphi_{\text{мфк}} = \frac{n_{\phi} 100}{n_{\Gamma} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}}.$$

При расчете МФК принимают, что при сгорании горючего вещества на этом пределе углерод, содержащийся в нем, окисляется в основном до СО.

Концентрация горючего в смеси, соответствующая точке флегматизации, % об.,

$$\varphi_{\Gamma(\phi)} = \frac{V_{\Gamma} 100}{V_{\Gamma} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} \quad (4.27)$$

$$\text{или } \varphi_{\text{мфк}} = \frac{n_{\Gamma} 100}{n_{\Gamma} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}}.$$

Концентрацию кислорода в этой же смеси (в точке флегматизации) называют минимальным взрывоопасным содержанием кислорода (МВСК), она будет равна

$$\varphi_{\text{O}_2(\phi)} = \frac{V_{\text{O}_2} 100}{V_{\Gamma} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\phi}} \quad (4.28)$$

$$\text{или } \varphi_{\text{O}_2(\phi)} = \frac{n_{\text{O}_2} 100}{n_{\Gamma} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}}.$$

Примечание. Значения МВСК, полученные экспериментально для некоторых газоздушных смесей при разбавлении их CO_2 , приведены в табл. 6 – 8 приложения.

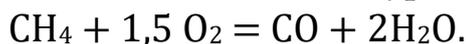
Пример 4.8. Рассчитать значения МФК и МВСК при разбавлении метановоздушной смеси водяным паром. Построить зависимость КПР от концентрации флегматизатора.

Решение. МФК найдем из условия предельной адиабатической температуры горения стехиометрической метановоздушной смеси, формула (4.24), где $T_r = 1500 \text{ К}$

$$V_\phi = \frac{Q_H - (T_r - T_0) \sum C_{pi} V_{pi}}{(T_r - T_0) C_{p\phi}}.$$

Поскольку при этих условиях сгорание идет в основном с образованием CO , определим низшую теплоту сгорания метана для такого случая.

Запишем химическое уравнение горения метана



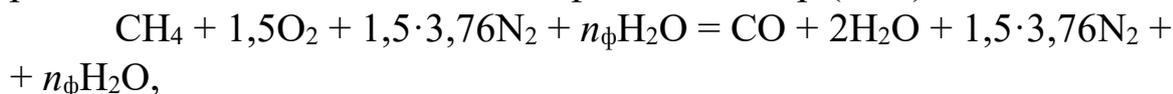
Низшая теплота сгорания метана в этом случае по закону Гесса

$$Q_H = 2\Delta H_{f_{\text{CO}}}^0 + \Delta H_{f_{\text{H}_2\text{O}}}^0 - \Delta H_{f_{\text{CH}_4}}^0.$$

Подставим значения теплоты образования, взятые из табл. 2 приложения, получим

$$Q_H = 112,7 + 2 \cdot 242,2 - 75 = 522,1 \text{ кДж/моль}.$$

Теперь составим уравнение материального баланса процесса горения метана, включив в него и флегматизатор (H_2O)



где n_ϕ – число молей флегматизатора.

Из правой части уравнения материального баланса видно, что объем продуктов сгорания

$$V_{\text{CO}} = 1 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}; V_{\text{H}_2\text{O}} = 2 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}; V_{\text{N}_2}^0 = 1,5 \cdot 3,76 = 5,64 \frac{\text{МОЛЬ}}{\text{МОЛЬ}}.$$

Уравнение (4.24) для данного случая примет вид

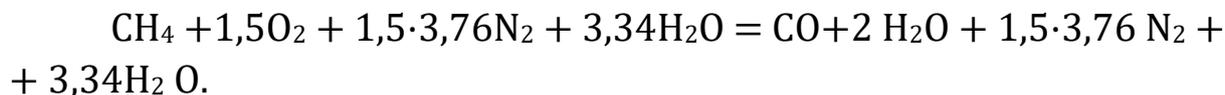
$$V_\phi = \frac{Q_H - (T_r - T_0)[C_{p_{\text{CO}}} V_{\text{CO}} + C_{p_{\text{H}_2\text{O}}} V_{\text{H}_2\text{O}} + C_{p_{\text{N}_2}} V_{\text{N}_2}^0]}{(T_r - T_0) C_{p_{\text{H}_2\text{O}}}}.$$

Подставляя значения Q_H , $T_0 = 1500 \text{ К}$, $C_{p_{pi}}$, взятые из табл. 4.1, получим, что объем флегматизатора, соответствующий МФК,

$$V_{\phi} = \frac{522,1 - (1500 - 273)(3,37 \cdot 10^{-2} \cdot 1 + 3,98 \cdot 10^{-2} \cdot 2 + 3,18 \cdot 10^{-2} \cdot 5,64 l)}{(1500 - 273)3,98 \cdot 10^{-2}} =$$

$$= 3,34 \frac{\text{моль}}{\text{моль}}$$

Перепишем уравнение материального баланса для сгорания смеси предельного состава



В исходной горючей смеси (левая часть уравнения) на 1 моль метана приходится $n_{\text{O}_2} = 1,5$ моля кислорода, $n_{\text{N}_2} = 1,5 \cdot 3,76$ моля азота и $n_{\phi(\text{H}_2\text{O})} = 3,34$ моля флегматизатора.

Минимальная флегматизирующая концентрация паров воды будет равна

$$\varphi_{\text{мфк}} = \frac{n_{\phi} 100}{n_{\text{r}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}} = \frac{3,34 \cdot 100}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,34} = 29,1 \%,$$

а концентрация горючего в точке флегматизации

$$\varphi_{\text{r}(\phi)} = \frac{n_{\text{r}} 100}{n_{\text{r}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} + n_{\phi}} = \frac{1 \cdot 100}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,34} = 8,7 \%.$$

Концентрационные пределы распространения пламени для метана в воздухе составляют 5 и 15 % (об.). Этих данных достаточно для построения зависимости КПР метана от концентрации флегматизатора (рис. 4.2).

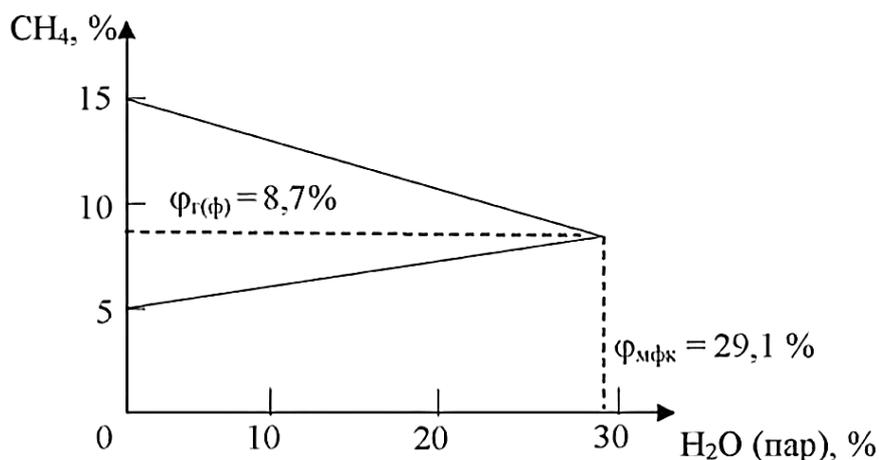


Рис. 4.2. Зависимость КПР метана от концентрации флегматизатора (водяной пар)

Минимальное взрывоопасное содержание кислорода (концентрация кислорода в точке флегматизации)

$$\varphi_{r(\phi)} = \frac{n_{o_2} 100}{n_r + n_{o_2} + n_{N_2} + n_{\phi}} = \frac{1,5}{1 + 1,5 + 1,5 \cdot 3,76 + 3,34} = 13,0 \%$$

4.5. Температурные параметры пожарной опасности

4.5.1. Температурные пределы распространения пламени

Температурные пределы распространения пламени (ТПР) характеризуют пожарную опасность жидких горючих веществ. Нижний температурный предел распространения – это температура жидкости, при которой концентрация насыщенных паров над ее поверхностью равна НКПР. Аналогично при верхнем температурном пределе распространения пламени концентрация насыщенных паров жидкости равна ВКПР. Из этого следует, что если для горючего вещества известны КПР, то по зависимости давления насыщенного пара от температуры могут быть найдены температурные пределы.

Допустим, известен НКПР пламени паров горючей жидкости. Необходимо найти НТПР, т. е. температуру, при которой концентрация насыщенных паров над поверхностью этой жидкости будет равна НКПР. По концентрации паров φ_n (значение НКПР) можно найти парциальное давление насыщенных паров

$$P_n = \frac{\varphi_n P_0}{100}, \quad (4.29)$$

где P_0 – атмосферное давление (общее давление паровоздушной смеси).

По давлению насыщенного пара нетрудно установить соответствующую температуру жидкости, которая и будет значением НТПР. Зависимость давления насыщенного пара от температуры для большинства жидкостей известна и приведена в справочной литературе в виде таблиц, графиков или задана уравнением Антуана $\lg P = f(T)$ (см. табл. 3 приложения).

Пример 4.9. Определить значение НТПР метилового спирта по нижнему концентрационному пределу распространения пламени. Принять, что атмосферное давление равно нормальному ($P_0 = 101,3$ кПа).

Решение. 1. По справочнику или расчетом находим, что НКПР метилового спирта равен 6 % об. Затем определяем, какому давлению

насыщенного пара соответствует значению нижнего концентрационного предела:

$$P_{\text{н}} = \frac{\varphi_{\text{н}} P_0}{100} = \frac{6 \cdot 101,3}{100} = 6,08 \text{ кПа.}$$

2. Для нахождения значения НТПР ($T_{\text{н}}$) по известной величине $P_{\text{н}}$ можно воспользоваться уравнением Антуана, выражающим зависимость давления насыщенного пара от температуры жидкости.

$$\lg P = A - \frac{B}{C + t}, \quad (4.30)$$

где P выражено в кПа, а t в $^{\circ}\text{C}$.

Константы уравнения Антуана приведены в табл. 3 приложения. Решая уравнение относительно t , получим

$$t = \frac{B}{A - \lg P} - C. \quad (4.31)$$

Для метилового спирта $A = 73527$, $B = 1660,454$, $C = 245,818$. Подставляя численные значения в уравнение (4.31), получим:

$$t_{\text{н}} = \frac{1660,454}{7,3527 - \lg 6,08} - 245,818 = 70 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ или } 280 \text{ К.}$$

В табл. 9 приложения приведены показатели пожарной опасности некоторых жидкостей, откуда видно, что для метанола справочное значение НТПР составляет 280 К.

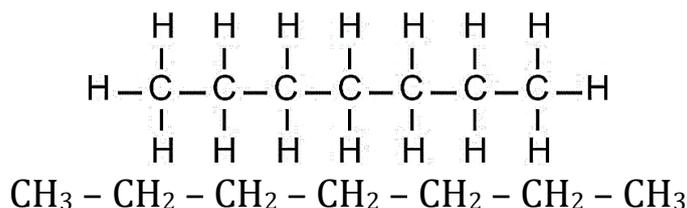
4.5.2. Температура самовоспламенения

Температура самовоспламенения $T_{\text{св}}$, приведенная в справочниках, получена экспериментально по стандартной методике для горючей смеси стехиометрического состава. Установлено, что в пределах гомологического ряда величина $T_{\text{св}}$ является функцией длины углеродной цепи в молекуле. Чем длиннее цепь, тем ниже температура самовоспламенения. Метод расчета $T_{\text{св}}$ основан на эмпирической зависимости $T_{\text{св}}$ от средней длины углеродной цепи.

Метод пригоден для расчета $T_{\text{св}}$ алифатических углеводородов, алифатических спиртов и ароматических углеводородов. Задача состоит в том, чтобы по структурной формуле химического соединения найти для него среднюю длину углеродных цепей.

Углеродная цепь – это цепочка атомов углерода от одного конца молекулы до другого.

Длина цепи – это число атомов углерода в такой цепи. Например, в нормальном гептane



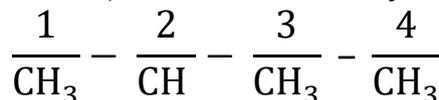
одна углеродная цепь и ее длина 7.

В изобутане



n-бутан ($T_{\text{кип}} = -0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$)

изобутан ($T_{\text{кип}} = -11,7 \text{ } ^\circ\text{C}$)



три цепи с одинаковой длиной (1-2-3, 1-2-4 и 3-2-4), длина каждой цепи равна 3. Средняя длина углеродных цепей в этом соединении тоже равна 3.

Определив среднюю длину цепи, далее по табл. 7 приложения находят $T_{\text{св}}$.

Например, для *n*-гептана $T_{\text{св}} = 496 \text{ K}$, а для изобутана $T_{\text{св}} = 743 \text{ K}$ (табл. 7 для предельных углеводородов).

В молекуле химического соединения со сложной структурой бывает трудно сразу найти все углеродные цепи. Поэтому для определения числа цепей используют формулу

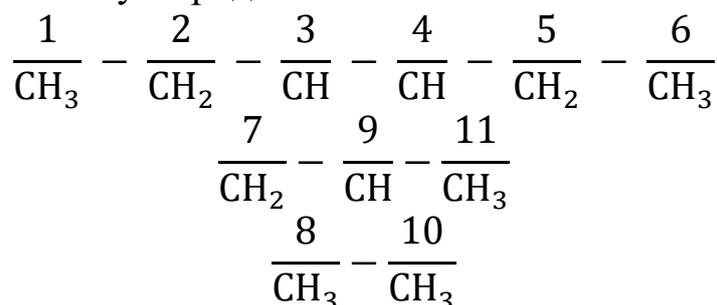
$$m = \frac{M_p (M_p - 1)}{2}, \quad (4.32)$$

где M_p – число концевых функциональных групп, таких как метил ($-\text{CH}_3$), гидроксил ($-\text{OH}$) и фенил ($-\text{C}_6\text{H}_5$).

Например, в *n*-гептане две группы CH_3 , т. е. $M_p = 2$, из формулы (4.32) следует, что число цепей равно 1. В изобутане $M_p = 3$, подставляя это значение в формулу (4.32), получим $m = 3$.

Пример 4.10. Вычислить температуру самовоспламенения 3-этил-4-изо-пропилгексан.

Р е ш е н и е. 1. Запишем структурную формулу соединения, пронумеруем все атомы углерода



2. В молекуле соединения пять концевых метильных групп CH_3 , т. е. $M_p = 5$. Определяем число цепей

$$m = \frac{M_p (M_p - 1)}{2} = \frac{5(5 - 1)}{2} = 10.$$

3. Составим таблицу, в которую внесем цепи и их длину

Углеродная цепь m_i	1-6	1-8	1-10	1-11	6-8	6-10	6-11	8-10	8-11	10-11
Длина цепи l_i	6	5	6	6	6	5	5	6	6	3

4. Определяем среднее арифметическое значение длины углеродных цепей

$$l_{\text{ср}} = \frac{6 \cdot 6 + 5 \cdot 3 + 3}{10} = 5,4.$$

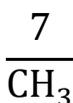
5. По табл. 7 приложения находим температуру самовоспламенения 3-этил-4-изопропилгексана по значению средней длины цепи в молекуле соединения $T_{\text{св}} = 522 \text{ K} = 149 \text{ }^\circ\text{C}$.

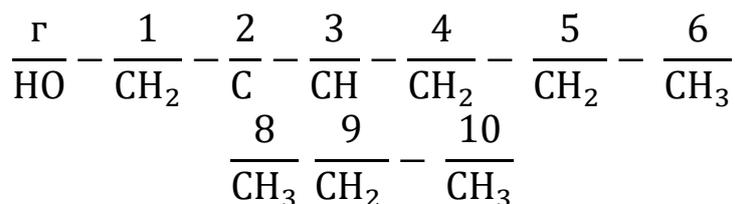
Особенности расчета $T_{\text{св}}$ алифатических спиртов

При определении длины углеродной цепи в молекуле алифатического спирта необходимо учитывать следующее правило. Гидроксильная группа в углеродной цепи увеличивает ее длину на единицу.

Пример 4.11. Вычислить температуру самовоспламенения 2,2-диметил-3-этилгексанола-1.

Р е ш е н и е. 1. Запишем структурную формулу соединения и пронумеруем все атомы углерода, группу $-\text{OH}$ обозначим буквой Г (гидроксил)





2. В молекуле пять концевых групп: четыре метильных ($-\text{CH}_3$) и одна гидроксильная ($-\text{OH}$), т. е. $M_p = 5$. Тогда число цепей

$$M = \frac{M_p(M_p - 1)}{2} = \frac{5(5 - 1)}{2} = 10.$$

3. Составим таблицу, в которую внесем цепи и их длину.

Углеродная цепь m_i	Г-6	Г-7	Г-8	Г-10	7-6	7-8	7-10	6-8	6-10	8-10
Длина цепи l_i	7	4	4	6	6	3	5	6	6	5

Длина первых четырех цепей, содержащих гидроксильную группу $-\text{OH}$, на единицу больше, чем число атомов углерода в цепи.

4. Рассчитаем среднюю длину углеродных цепей

$$L_{\text{ср}} = \frac{7 + 6 \cdot 4 + 5 \cdot 2 + 4 \cdot 2 + 3}{10} = 5,2.$$

5. По табл. 7 приложения находим соответствующую температуру самовоспламенения $T_0 = 582 \text{ K} = 309 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.6. Параметры взрыва газопаровоздушных смесей

К показателям взрывоопасности веществ относятся такие параметры, как максимальное давление взрыва, тротильный эквивалент вещества и тротильный эквивалент взрыва, или мощность взрыва.

4.6.1. Максимальное давление взрыва

Максимальное давление взрыва – это давление, которое возникает в результате сгорания или детонации парогазовых смесей в изохорно-адиабатических условиях. При сгорании парогазовой смеси в замкнутом объеме изменение давления в системе вызвано повышением температуры и изменением числа молей газа, которое происходит в результате химического превращения. Исходя из этого, максимальное давление взрыва парогазовых смесей рассчитывают по формуле

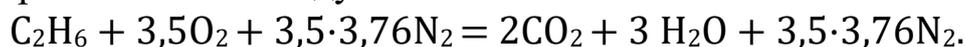
$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = P_0 \frac{T_{\text{взр}} n_{\text{пг}}}{T_0 n_c}, \quad (4.33)$$

где P_0 , T_0 и n_c – давление, температура и количество молей горючей смеси до взрыва;

$T_{\text{взр}}$ и $n_{\text{пг}}$ – температура взрыва и количество молей продуктов горения.

Пример 4.12. Рассчитать максимальное давление взрыва газовой этановоздушной смеси стехиометрического состава. Считать, что исходная смесь до взрыва находилась при нормальных условиях ($T_0 = 273 \text{ К}$, $P_0 = 101,3 \text{ кПа}$). Оценить возможность разрушения технологического оборудования, рассчитанного на давление $P_{\text{пред}} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кПа}$ при взрыве этановоздушной смеси.

Решение. Запишем уравнение материального баланса процесса горения этана в воздухе



По уравнению определим количество молей газовой смеси до взрыва n_c и после взрыва $n_{\text{пг}}$

$$n_c = n_{\text{г}} + n_{\text{O}_2} + n_{\text{N}_2} = 1 + 3,5 + 3,5 \cdot 3,76 = 17,7 \text{ моль};$$

$$n_{\text{пг}} = n_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{N}_2} = 2 + 3 + 3,5 \cdot 3,76 = 18,2 \text{ моль}.$$

Температуру взрыва можно определить методом последовательных приближений. Воспользуемся расчетами, приведенными в примере 4.6, где было получено значение температуры взрыва для стехиометрической этановоздушной смеси $T_{\text{взр}} = 2875 \text{ К}$. Подставим значения величин в формулу (4.33), получим

$$P_{\text{взр}}^{\text{max}} = 101,3 \frac{2875 \cdot 18,2}{273 \cdot 17,7} = 1096,9 \text{ кПа}.$$

Избыточное давление взрыва

$$\Delta P_{\text{взр}} = P_{\text{взр}}^{\text{max}} - P_0 = 1096,9 - 101,3 = 995,6 \text{ кПа},$$

так как $P_{\text{взр}}^{\text{max}} < P_{\text{пред}}$, можно сделать вывод, что технологическое оборудование не разрушится.

4.6.2. Мощность взрыва и безопасное расстояние при воздействии воздушных ударных волн

По оценке мощности взрыва используется понятие тротилового эквивалента. Известно, что при взрыве 1 кг тротила (тринитротолуола – ТНТ) выделяется энергия, равная $Q_{\text{ТНТ}} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ кДж/кг}$. Исходя из

этого, мощность любого взрыва можно условно характеризовать количеством тротила, которое может произвести во взрыве выделение такого же количества энергии.

Количество тротила, или тротиловый эквивалент взрыва, будет равно

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{взр}} m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}}, \quad (4.34)$$

где $Q_{\text{взр}}$ – количество теплоты (энергии), выделяющейся при взрыве, кДж/кг;

m – масса горючего вещества, участвующего во взрыве;

γ – доля потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую энергию взрыва.

При взрыве парогазовой смеси углеводородных топлив в ограниченном объеме (оборудование, помещение) коэффициент γ принимают равным единице, при взрыве в неограниченном объеме (взрыв облака парогазовой смеси) коэффициент γ , как правило, принимают равным 0,4.

Учитывая, что $Q_{\text{взр}} \approx Q_{\text{н}}$, уравнение (4.34) можно записать в виде

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{н}} m \gamma}{Q_{\text{ТНТ}}}. \quad (4.35)$$

Величину

$$\eta_{\text{ТНТ}} = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{ТНТ}}} \quad (4.36)$$

называют тротиловым эквивалентом вещества.

Размер безопасной зоны при воздействии давления ударной воздушной волны взрыва $R_{\text{без}}$ рассчитывают по формуле, м,

$$R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{M_{\text{ТНТ}}}. \quad (4.37)$$

Пример 4.13. Определить тротиловый эквивалент взрыва паровоздушного облака, образовавшегося при аварийном разливе и испарении 500 кг ацетона. Оценить безопасное расстояние при воздействии ударной воздушной волны.

Решение. Для определения тритилового эквивалента взрыва паровоздушного облака необходимо знать $Q_{\text{н}}$ ацетона. Величину $Q_{\text{н}}$

можно рассчитать по закону Гесса или взять из табл. 10 приложения. Согласно справочным данным для ацетона $Q_H = 1668$ кДж/моль. Учитывая, что масса 1 моля ацетона равна $58 \cdot 10^{-3}$ кг/моль,

$$Q_H = \frac{1668}{58 \cdot 10^{-3}} = 28,8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Доля потенциальной энергии, перешедшей в кинетическую энергию при взрыве облака парогазовой смеси, принимается равной $\gamma = 0,4$. Энергия взрыва 1 кг тротила $Q_{\text{ТНТ}} = 4,19 \cdot 10^3$ кДж/кг.

Подставляя эти величины в формулу (4.35), получим

$$M_{\text{ТНТ}} = \frac{28,8 \cdot 10^3 \cdot 500 \cdot 0,4}{4,19 \cdot 10^3} = 1375 \text{ кг тротила}.$$

Таким образом, взрыв паровоздушного облака, образовавшего 500 кг ацетона, эквивалентен взрыву 1375 кг тротила.

Безопасное расстояние при воздействии ударной воздушной волны при взрыве паровоздушной смеси согласно (4.37) будет равно

$$R_{\text{без}} = 15 \sqrt[3]{1375} = 170 \text{ м}.$$

Контрольные вопросы

1. В чем отличие уравнения материального баланса процесса горения от уравнения химической реакции?
2. Дайте определение коэффициента избытка воздуха.
3. Что понимают под температурой горения?
4. При горении какой смеси будет максимальная температура горения?
5. В чем принципиальное отличие между горением и взрывом?
6. Что такое максимальное давление взрыва?
7. Какие параметры относятся к показателям взрывоопасности вещества?
8. Дайте определение показателю «максимальное давление взрыва».
9. Как определить тротиловый эквивалент вещества?
10. Для оценки какого показателя взрывоопасности вещества используется понятие «тротиловый эквивалент взрыва»?

5. МЕТОД РАСЧЕТА ИЗБЫТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ, РАЗВИВАЕМОГО ПРИ СГОРАНИИ ГАЗОПАРОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПОМЕЩЕНИИ

5.1. Выбор и обоснование расчетного варианта

5.1.1. При расчете значений критериев пожарной безопасности при сгорании газопаровоздушной смеси в качестве расчетного следует выбирать наиболее неблагоприятный вариант развития пожара (в период пуска, остановки, загрузки, выгрузки, складирования, ремонта, нормальной работы, аварии аппаратов или технологического процесса), при котором в помещение поступает (или постоянно находится) максимальное количество наиболее опасных в отношении последствий сгорания газопаровоздушных смесей.

5.1.2. Количество поступивших в помещение веществ, которые могут образовать горючие газовоздушные или паровоздушные смеси, определяют исходя из следующих предпосылок:

а) происходит расчетная авария одного из аппаратов согласно 5.1.1;

б) все содержимое аппарата поступает в помещение;

в) одновременно происходит утечка веществ из трубопроводов, питающих аппарат по прямому и обратному потоку в течение времени, необходимого для отключения трубопроводов.

Расчетное время отключения трубопроводов определяют в каждом конкретном случае исходя из реальной обстановки, и оно должно быть минимальным с учетом паспортных данных на запорные устройства, характера технологического процесса и вида расчетной аварии.

Расчетное время отключения трубопроводов следует принимать равным:

– времени срабатывания системы автоматики отключения трубопроводов согласно паспортным данным установки, если вероятность отказа системы не превышает $0,000001$ ($1 \cdot 10^{-6}$) в год или обеспечено резервирование ее элементов (но не более 120 с);

– 120 с, если вероятность отказа системы автоматики превышает $0,000001$ ($1 \cdot 10^{-6}$) в год и не обеспечено резервирование ее элементов;

– 300 с при ручном отключении.

Не допускается использование технических средств для отключения трубопроводов, для которых время отключения превышает вышеприведенные значения. Быстродействующие клапаны-отсекатели должны автоматически перекрывать подачу газа или жидкости при нарушении электроснабжения;

г) происходит испарение с поверхности разлившейся жидкости. Площадь испарения при разливе на пол определяют (при отсутствии справочных данных) исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих 70 % и менее (по массе) растворителей, разливается на 0,5 м², а остальные жидкости – на 1 м² пола помещения;

д) происходит также испарение жидкостей из емкостей, эксплуатируемых с открытым зеркалом жидкости, и со свежеекрашенных поверхностей;

е) длительность испарения жидкости принимают равной времени ее полного испарения, но не более 3600 с.

5.1.3. Свободный объем помещения определяют как разность между объемом помещения и объемом, занимаемым технологическим оборудованием. Если свободный объем помещения определить невозможно, то его допускается принимать условно равным 80 % геометрического помещения объема.

5.1.4. Определение пожароопасных свойств веществ и материалов проводят на основании результатов испытаний или расчетов по стандартным методикам с учетом параметров состояния (давление, температура и т. д.).

Допускается использование справочных данных, опубликованных головными научно-исследовательскими организациями в области пожарной безопасности или выданных Государственной службой стандартных справочных данных.

Допускается использование показателей пожарной опасности для смесей веществ и материалов по наиболее опасному компоненту.

5.2. Расчет избыточного давления для горючих газов, паров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей

5.2.1. Избыточное давление ΔP для индивидуальных горючих веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, I, F, рассчитывают по формуле, кПа,

$$\Delta P = (P_{max} - P_0) \frac{mZ}{V_{св} \rho_{гп}} \frac{100}{C_{ст}} \frac{1}{K_H}, \quad (5.1)$$

где P_{max} – максимальное давление, развиваемое при сгорании стехиометрической газовой или паровой смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным в соответствии с требованиями п. 5.1.4. При отсутствии данных допускается принимать P_{max} равным 900 кПа;

P_0 – начальное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);

m – масса горючего газа (ГГ) или паров легко воспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих жидкостей (ГЖ), вышедших в результате расчетной аварии в помещение, вычисляемая для ГГ по формуле (5.14), а для паров ЛВЖ и ГЖ по формуле (5.19), кг;

Z – коэффициент участия горючего при сгорании газопаровой смеси, который может быть рассчитан на основе характера распределения газов и паров в объеме помещения согласно пп. 5.2.3 и 5.2.4. Допускается принимать Z по табл. 5.1;

$V_{св}$ – свободный объем помещения, м³;

$\rho_{гп}$ – плотность газа или пара при расчетной температуре t_p , вычисляемая по формуле, кг/м³,

$$\rho_{гп} = \frac{M}{V_0 (1 + 0,00367 t_p)}, \quad (5.2)$$

где M – молярная масса, кг/кмоль;

V_0 – мольный объем, равный 22,413 м³/кмоль;

t_p – расчетная температура, °С.

В качестве расчетной температуры следует принимать максимально возможную температуру воздуха в данном помещении в соответствующей климатической зоне или максимально возможную температуру воздуха по технологическому регламенту с учетом возможного повышения температуры в аварийной ситуации. Если такого значения расчетной температуры t_p по каким-либо причинам определить не удастся, допускается принимать ее равной 61°С;

$C_{ст}$ – стехиометрическая концентрация ГГ или паров ЛВЖ и ГЖ, вычисляемая по формуле, % (об.),

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84 \beta}, \quad (5.3)$$

где $\beta = n_c + \frac{n_H - n_x}{4} - \frac{n_o}{2}$ – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения;

n_c, n_H, n_o, n_x – число атомов С, Н, О и галоидов в молекуле горючего;

K_H – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. Допускается принимать K_H равным трем.

Таблица 5.1

Коэффициент участия горючего вещества

Вид горючего вещества	Значение
Водород и нагретые выше температуры вспышки высокотемпературные органические теплоносители	1,0
Горючие газы	0,5
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые до температуры вспышки и выше	0,3
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при наличии возможности образования аэрозоли	0,3
Легковоспламеняющиеся и горючие жидкости, нагретые ниже температуры вспышки, при отсутствии возможности образования аэрозоли	0 – 0,1

5.2.2. Расчет ΔP для индивидуальных веществ, кроме упомянутых в п. 5.2.1, а также для смесей может быть выполнен по формуле, кПа,

$$\Delta P = \frac{m H_T \rho_0 Z}{V_{\text{св}} \rho_{\text{в}} C_p T_0} \frac{1}{K_H}, \quad (5.4)$$

где H_T – теплота сгорания, Дж/кг;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха при начальной температуре T_0 , кг/м³;

C_p – теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К), допускается принимать равной $1,01 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К);

T_0 – начальная температура воздуха, К.

5.2.3. Приведенные в пп. 5.2.3 и 5.2.4 расчетные формулы применяются для случая $\frac{100m}{(\rho_{г,л} \cdot V_{св})} < 0,5 C_{НКПР}$ ($C_{НКПР}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени горючего газа или пара, % (об.)) и помещений в форме прямоугольного параллелепипеда с отношением длины к ширине не более пяти.

Коэффициент участия Z горючих газов и паров, не нагретых выше температуры окружающей среды легко воспламеняющихся жидкостей при сгорании газопаровоздушной смеси для заданного уровня значимости Q ($C > \bar{C}$) (уровень значимости – вероятность того, что значение концентрации C превысит значение математического ожидания этой случайной величины \bar{C}) рассчитывают по формулам:

при $X_{НКПР} \leq 0,5l$ и $Y_{НКПР} \leq 0,5b$

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \pi}{m} \rho_{г,л} \left(C_0 + \frac{C_{НКПР}}{\delta} \right) X_{НКПР} Y_{НКПР} Z_{НКПР}, \quad (5.5)$$

при $X_{НКПР} \leq 0,5l$ и $Y_{НКПР} > 0,5b$

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \pi}{m} \rho_{г,л} \left(C_0 + \frac{C_{НКПР}}{\delta} \right) F Z_{НКПР}, \quad (5.6)$$

где m – масса газа или паров ЛВЖ, поступающих в помещение в соответствии с пп. 5.2.6 и 5.2.7, кг;

δ – допустимые отклонения концентраций при задаваемом уровне значимости Q ($C > \bar{C}$), приведенные в табл. 5.2;

l, b – соответственно длина и ширина помещения, м;

F – площадь пола помещения, м²;

C_0 – предэкспоненциальный множитель, % (об.), равный:

- при отсутствии подвижности воздушной среды для горючих газов

$$C_0 = 3,77 \cdot 10^3 \frac{m}{\rho_{г} V_{св}}, \quad (5.7)$$

- при подвижности воздушной среды для горючих газов

$$C_0 = 3 \cdot 10^2 \frac{m}{\rho_{г} V_{св} U}, \quad (5.8)$$

где U – подвижность воздушной среды, м/с;

- при отсутствии подвижности воздушной среды для паров легко воспламеняющихся жидкостей

$$C_0 = C_{н} \left[\frac{m100}{C_{н} P_{н} V_{св}} \right]^{0,41}, \quad (5.9)$$

где C_H – концентрация насыщенных паров при расчетной температуре $t_p, ^\circ\text{C}$, воздуха в помещении, % (об.). Концентрация C_H может быть найдена по формуле

$$C_H = \frac{100P_H}{P_0}, \quad (5.10)$$

где P_H – давление насыщенных паров при расчетной температуре (находится по справочной литературе), кПа;

P_0 – атмосферное давление, равное 101 кПа;

$\rho_{\text{п}}$ – плотность паров, кг/м³;

- при подвижности воздушной среды для паров легковоспламеняющихся жидкостей

$$C_0 = C_H \left[\frac{m100}{C_H P_H V_{\text{св}}} \right]^{0,46}. \quad (5.11)$$

Таблица 5.2

Значения допустимых отклонений δ концентраций при уровне значимости $Q (C > \bar{C})$

Характер распределения концентраций	$Q (C > \bar{C})$.	δ
Для горючих газов при отсутствии подвижности воздушной среды	0,100000 – 0,050000	1,29 – 1,38,
	0,010000 – 0,003000	1,53 – 1,63,
	0,001000 – 0,000001	1,70 – 2,04
Для горючих газов при подвижности воздушной среды	0,100000 – 0,050000	1,29 – 1,37,
	0,010000 – 0,003000	1,52 – 1,63,
	0,001000 – 0,000001	1,70 – 2,03
Для паров легковоспламеняющихся жидкостей при отсутствии подвижности воздушной среды	0,100000 – 0,050000	1,19 – 1,25,
	0,010000 – 0,003000	1,35 – 1,41,
	0,001000 – 0,000001	1,46 – 1,68
Для паров легковоспламеняющихся жидкостей при подвижности воздушной среды	0,100000 – 0,050000	1,21 – 1,27,
	0,010000 – 0,003000	1,38 – 1,45,
	0,001000 – 0,000001	1,51 – 1,75

Уровень значимости $Q (C > \bar{C})$ выбирают исходя из особенностей технологического процесса. Допускается принимать $Q (C > \bar{C})$ равным 0,05.

5.2.4. Коэффициент Z участия паров ненагретых легковоспламеняющихся жидкостей при сгорании паровоздушной смеси может быть определен по X , его рассчитывают по формуле

$$X = \begin{cases} C_H/C^*, & \text{если } C_H \leq C^*, \\ 1, & \text{если } C_H > C^*, \end{cases} \quad (5.12)$$

где $C^* = \varphi C_{ст}$ (φ – эффективный коэффициент избытка горючего, принимаемый равным 1,9).

5.2.5. В случае обращения в помещении горючих газов, легковоспламеняющихся или горючих жидкостей при определении массы m , входящей в формулы (5.1) и (5.4), допускается учитывать работу аварийной вентиляции, если она обеспечена резервными вентиляторами, автоматическим пуском при превышении предельно допустимой взрывобезопасной концентрации горючих газов и паров и электроснабжением по первой категории надежности при условии расположения устройств для удаления воздуха из помещения в непосредственной близости от места возможной аварии.

При этом массу m горючих газов, паров легковоспламеняющихся или горючих жидкостей, нагретых до температуры вспышки и выше, поступивших в объем помещения, следует разделить на коэффициент K , рассчитанный по формуле

$$K = AT + 1, \quad (5.13)$$

где A – кратность воздухообмена, создаваемого аварийной вентиляцией, c^{-1} ;

T – продолжительность поступления горючих газов и паров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в объем помещения, с (принимается по п. 5.1.2). Если в расчетной аварийной ситуации участвует аппарат (п. 5.1.2, перечисления а, б) с горючим газом или паровой фазой, то продолжительность поступления T принимается равной 0 с.

5.2.6. Массу m поступившего в помещение при расчетной аварии газа рассчитывают по формуле, кг,

$$m = (V_a + V_T)\rho_T, \quad (5.14)$$

где V_a – объем газа, вышедшего из аппарата, m^3 ;

V_T – объем газа, вышедшего из трубопроводов, m^3 .

При этом

$$V_a = 0,01P_1V, \quad (5.15)$$

где P_1 – давление в аппарате, кПа;

V – объем аппарата, m^3 .

$$V_T = V_{1T} + V_{2T}, \quad (5.16)$$

где V_{1T} – объем газа, вышедшего из трубопровода до его отключения, m^3 ;

V_{2T} – объем газа, вышедшего из трубопровода после его отключения, м^3 ;

$$V_{1T} = qT, \quad (5.17)$$

где q – расход газа, определяемый в соответствии с технологическим регламентом в зависимости от давления в трубопроводе, его диаметра, температуры газовой среды и т. д., $\text{м}^3/\text{с}$;

T – время, определяемое по п. 5.1.2, с.

$$V_{2T} = 0,01\pi P_2 (r_1^2 l_1 + r_2^2 l_2 + \dots + r_n^2 l_n), \quad (5.18)$$

где P_2 – максимальное давление в трубопроводе по технологическому регламенту, кПа;

$r_{1,2,\dots,n}$ – внутренний радиус трубопровода, м;

$l_{1,2,\dots,n}$ – длина трубопровода от аварийного аппарата до задвижек, м.

5.2.7. Массу паров жидкости m , поступивших в помещение при наличии нескольких источников испарения (поверхность разлитой жидкости, поверхность со свеженанесенным составом, с которой происходит испарение легколетучих веществ, открытые емкости и т. п.), рассчитывают по формуле

$$m = m_{\text{пов}} + m_{\text{емк}} + m_{\text{св.окр}}, \quad (5.19)$$

где $m_{\text{пов}}$ – масса жидкости, испарившейся с поверхности разлива, кг;

$m_{\text{емк}}$ – масса жидкости, испарившейся с поверхности открытых емкостей, кг;

$m_{\text{св.окр}}$ – масса жидкости, испарившейся с поверхностей, на которые нанесен применяемый состав, кг. При этом каждое из слагаемых в формуле (5.19) определяют по выражению

$$m = WS_{\text{и}}T, \quad (5.20)$$

где W – интенсивность испарения, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$;

$S_{\text{и}}$ – площадь испарения, м^2 , определяемая в соответствии с п. 5.1.2 в зависимости от массы жидкости m_n , поступившей в помещение.

Если аварийная ситуация связана с возможным поступлением жидкости в распыленном состоянии, то она должна быть учтена в формуле (5.19) введением дополнительного слагаемого, учитывающего общую массу поступившей жидкости от распыляющих устройств исходя из продолжительности их работ.

Масса паров жидкости, поступивших в помещение при аварийной ситуации, может быть определена экспериментально или расчетным путем.

5.2.8. Массу поступившей в помещение жидкости m_n определяют в соответствии с п. 5.1.2.

Пример 5.1. Расчет избыточного давления, развиваемого при сгорании газопаровоздушных смесей в помещении.

Данные для расчета.

В помещение со свободным объемом $V_{св} = 160 \text{ м}^3$ при аварийной разгерметизации аппарата поступает 117,9 кг паров ацетона. Максимально возможная температура для данной климатической зоны $t_p = 36 \text{ }^\circ\text{C}$. Молярная масса ацетона $M = 58,08 \text{ кг/кмоль}$.

Химическая формула ацетона $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$. Максимальное давление при сгорании стехиометрической паровоздушной смеси ацетона в замкнутом объеме $P_{\max} = 572 \text{ кПа}$.

Расчет.

Стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания ацетона равен

$$\beta = n_c + \frac{n_n - n_x}{4} - \frac{n_o}{2} = 3 + \frac{6 - 0}{4} - \frac{1}{2} = 4.$$

Стехиометрическая концентрация паров ацетона составит

$$C_{ст} = \frac{100}{1 + 4,84 \beta} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 4} = 4,91 \% \text{ (об.)}.$$

Плотность паров ацетона ρ_n при расчетной температуре t_p равна

$$\rho_n = \frac{M}{V_0 (1 + 0,00367 \cdot t_p)} = \frac{58,08}{22,413 (1 + 0,00367 \cdot 36)} = 2,29 \text{ кг/м}^3.$$

Тогда избыточное давление ΔP при сгорании паровоздушной смеси ацетона для расчетной аварии составит

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{m Z}{V_{св} \rho_{гп}} \frac{100}{C_{ст}} \frac{1}{K_n} = 572 - 101 \frac{117,9 \cdot 0,3}{160 \cdot 2,29} \frac{100}{4,91} \frac{1}{3} = 308,7 \text{ кПа}.$$

Пример 5.2. Определить избыточное давление, развиваемое при сгорании газовой смеси водорода, возникающей при аварийной разгерметизации трубопровода в производственном помещении.

Данные для расчета.

Через помещение, свободный объем которого $V_{св} = 200 \text{ м}^3$, проходит трубопровод с проходным сечением диаметром $d_{тр} = 50 \text{ мм}$, по

которому транспортируется водород H_2 с максимальным расходом $q = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ при нормальных условиях и с максимальным давлением $P_T = 150 \text{ кПа}$. Трубопровод оснащен системой автоматического отключения с временем срабатывания 2 с и с обеспечением резервирования ее элементов. Задвижки системы установлены перед стеной помещения в месте ввода трубопровода. Длина отсекаемого участка трубопровода $L_{\text{ТР}} = 10 \text{ м}$. Максимально возможная температура для данной климатической зоны $t_p = 39 \text{ }^\circ\text{C}$. Плотность водорода ρ_B при данной t_p равна $0,0787 \text{ кг/м}^3$. Молярная масса водорода $M = 2,016 \text{ кг/кмоль}$. Максимальное давление при сгорании стехиометрической газовой смеси водорода в замкнутом объеме $P_{\text{max}} = 730 \text{ кПа}$.

Расчет. Объем водорода, поступившего в помещение в результате аварийной разгерметизации трубопровода, будет равен

$$V_B = V_{1T} + V_{2T} = 0,01 + 0,02945 = 0,03945 \text{ м}^3,$$

$$V_{1T} = qT = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 0,01 \text{ м}^3,$$

$$V_{2T} = 0,01\pi P_T r_{\text{ТР}}^2 L_{\text{ТР}} = 0,01 \cdot 3,14 \cdot 150 \left(\frac{5 \cdot 10^{-2}}{2} \right)^2 10 = \\ = 0,02945 \text{ м}^3.$$

Масса водорода, поступившего в помещение при расчетной аварии, составит

$$m_B = V_B \rho_B = 0,03945 \cdot 0,087 = 3,105 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания водорода равен

$$\beta = n_c + \frac{n_H - n_x}{4} - \frac{n_0}{2} = 0 + \frac{2 - 0}{4} - \frac{0}{2} = 0,5.$$

Стехиометрическая концентрация водорода составит

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84\beta} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 0,5} = 29,24 \% (\text{об.}).$$

Избыточное давление ΔP при сгорании водородовоздушной смеси, образующейся в результате расчетной аварии, равно

$$\Delta P = (P_{\text{max}} - P_0) \frac{m Z}{V_{\text{св}} \rho_{\text{гп}}} \frac{100}{C_{\text{ст}}} \frac{1}{K_H} = (730 - 101) \frac{3,105 \cdot 10^{-3}}{200 \cdot 0,0787} \frac{100}{29,24} \frac{1}{3} = \\ = 0,14 \text{ кПа}.$$

Пример 5.3. Определить коэффициент Z участия паров ацетона при сгорании паровоздушной смеси для случая разгерметизации аппарата с ацетоном.

Данные для расчета.

В центре помещения размерами 40×40 м, высотой $H_{\text{п}} = 3$ м установлен аппарат с ацетоном. Аппарат представляет собой цилиндр диаметром основания $d_a = 0,5$ м и высотой $h_a = 1$ м, в котором содержится 25 кг ацетона. Расчетная температура в помещении $t_p = 30$ °С. Плотность паров ацетона ρ_a при t_p равна $2,33$ кг/м³. Давление насыщенных паров ацетона P_n при t_p равно $37,73$ кПа. Нижний концентрационный предел распространения пламени $C_{\text{НКПР}} = 2,7$ % (об.). В результате разгерметизации аппарата в объем помещения поступит 25 кг паров ацетона за время испарения $T = 208$ с. При работающей общеобменной вентиляции подвижность воздушной среды в помещении $\nu = 0,1$ м/с.

Расчет. Параметры C_0 , $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$, $Z_{\text{НКПР}}$ находятся следующим образом:

$$X_{\text{НКПР}} < 0,5l \text{ и } Y_{\text{НКПР}} < 0,5b,$$

коэффициент Z составит:

– при работающей вентиляции

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \pi}{m} P_a \left(C_0 + \frac{C_{\text{НКПР}}}{\delta} \right) X_{\text{НКПР}} \cdot Y_{\text{НКПР}} \cdot Z_{\text{НКПР}} =$$

$$= \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14}{25} 2,33 \left(3,93 + \frac{2,7}{1,27} \right) 9,01 \cdot 9,01 \cdot 0,2 = 0,14;$$

– при неработающей вентиляции

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14}{25} 2,33 \left(5,02 + \frac{2,7}{1,25} \right) 10,56 \cdot 10,56 \cdot 0,03 = 0,04.$$

Пример 5.4. Определить коэффициент Z участия метана при сгорании газовой смеси для случая аварийной разгерметизации газового баллона с метаном.

Данные для расчета.

На полу помещения размерами 13×13 м и высотой $H_n = 3$ м находится баллон с $0,28$ кг метана. Газовый баллон имеет высоту $h_6 = 1,5$ м. Расчетная температура в помещении $t_p = 30$ °С. Плотность метана ρ_m при данной $t_p = 0,645$ кг/м³. Нижний концентрационный предел распространения пламени метана $C_{\text{НКПР}} = 5,28$ % (об.). При работающей

общеобменной вентиляции подвижность воздушной среды в помещении $v = 0,1$ м/с.

Расчет. Параметры C_0 , $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$, $Z_{\text{НКПР}}$ приведены в примере 2.1 разд. 2.

Так как при неработающей вентиляции

$$X_{\text{НКПР}} < 0,5l \text{ и } Y_{\text{НКПР}} < 0,5b,$$

коэффициент Z составит

$$Z = \frac{5 \cdot 10^{-3} \pi}{m} P_M \left(C_0 + \frac{C_{\text{НКПР}}}{\delta} \right) X_{\text{НКПР}} \cdot Y_{\text{НКПР}} \cdot Z_{\text{НКПР}} =$$

$$= \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14}{0,28} 0,645 \left(4,04 + \frac{5,28}{1,38} \right) 3,43 \cdot 3,43 \cdot 0,02 = 0,07.$$

5.3. Горючие пыли

5.3.1. Расчет избыточного давления при сгорании пылевоздушной смеси в помещении

5.3.1.1. Избыточное давление при сгорании пылевоздушной смеси ΔP рассчитывают по формуле, кПа,

$$\Delta P = \frac{M H_T P_0 Z}{V_{\text{св}} \rho_{\text{в}} C_p T_0 K_H}, \quad (5.21)$$

где M – расчетная масса взвешенной в объеме помещения горючей пыли, образовавшейся в результате аварийной ситуации, кг;

H_T – теплота сгорания пыли, Дж/кг;

P_0 – начальное атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа);

Z – доля участия взвешенной горючей пыли при сгорании пылевоздушной смеси;

$V_{\text{св}}$ – свободный объем помещения, м³;

$\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха до сгорания пылевоздушной смеси при начальной температуре T_0 , кг/м³;

C_p – теплоемкость воздуха Дж/(кг · К), допускается принимать равной 1010 Дж/(кг · К);

T_0 – начальная температура воздуха, К;

K_H – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. Допускается принимать K_H равным трем.

К пылям, способным образовывать горючие пылевоздушные смеси, относят дисперсные материалы, характеризующиеся наличием показателей пожарной опасности: нижним концентрационным пределом распространения пламени, максимальным давлением, развиваемым при сгорании пылевоздушной смеси (более 50 кПа), и скоростью его нарастания, минимальным пожароопасным содержанием кислорода (менее 21 %).

5.3.1.2. Z рассчитывают по формуле

$$Z = 0,5F, \quad (5.22)$$

где F – массовая доля частиц пыли размером менее критического, с превышением которого взрывозвесь становится взрывобезопасной, т. е. неспособной распространять пламя. При отсутствии возможности получения сведений для расчета Z допускается принимать $Z = 0,5$.

5.3.1.3. M рассчитывают по формуле, кг,

$$M = \min \left\{ \begin{array}{l} M_{вз} + M_{ав}, \\ \frac{\rho_{см} V_{ав}}{Z} \end{array} \right., \quad (5.23)$$

где $M_{вз}$ – расчетная масса взвихрившейся пыли, кг;

$M_{ав}$ – расчетная масса пыли, поступившей в помещение в результате аварийной ситуации, кг;

$\rho_{см}$ – стехиометрическая концентрация горючей пыли в взвеси, кг/м³;

$V_{ав}$ – расчетный объем пылевоздушного облака, образованного при аварийной ситуации в объеме помещения, м³.

При отсутствии возможности получения сведений для расчета $V_{ав}$ допускается принимать $M = M_{вз} + M_{ав}$.

5.3.1.4. $M_{вз}$ рассчитывают по формуле

$$M_{вз} = K_{вз} M_n, \quad (5.24)$$

где $K_{вз}$ – доля отложенной в помещении пыли, способной перейти во взвешенное состояние в результате аварийной ситуации. При отсутствии экспериментальных сведений о $K_{вз}$ допускается полагать $K_{вз} = 0,9$;

M_n – масса отложившейся в помещении пыли к моменту аварии, кг.

5.3.1.5. $M_{ав}$ рассчитывают по формуле

$$M_{ав} = (M_{ап} + qT)K_n, \quad (5.25)$$

где $M_{ап}$ – масса горючей пыли, выбрасываемой в помещение при разгерметизации одного из технологических аппаратов, кг. При отсутствии ограничивающих выброс пыли инженерных устройств следует полагать, что в момент расчетной аварии происходит аварийный выброс в помещение всей находившейся в аппарате пыли;

q – производительность, с которой продолжается поступление пылевидных веществ в аварийный аппарат по трубопроводам до момента их отключения, кг/с;

T – расчетное время отключения, определяемое в каждом конкретном случае исходя из реальной обстановки:

- следует принимать равным времени срабатывания системы автоматики, если вероятность ее отказа не превышает 0,000001 в год;
- 120 с, если вероятность отказа системы автоматики превышает 0,000001 в год;
- 300 с при ручном отключении;

K_n – коэффициент пыления, представляющий отношение массы взвешенной в воздухе пыли ко всей массе пыли, поступившей из аппарата в помещение. При отсутствии экспериментальных сведений о K_n допускается полагать:

- $K_n = 0,5$ – для пылей с дисперсностью не менее 350 мкм;
- $K_n = 1,0$ – для пылей с дисперсностью не более 350 мкм.

5.3.1.6. M_n рассчитывают по формуле

$$M_n = \frac{K_r}{K_y} (M_1 + M_2), \quad (5.26)$$

где K_r – доля горючей пыли в общей массе отложений пыли;

K_y – коэффициент эффективности пылеуборки. Принимать равным 0,6 при сухой и 0,7 – при влажной (ручной) пылеуборке; при механизированной вакуумной пылеуборке для ровного пола K_y принимать равным 0,9, для пола с выбоинами (до 5 % площади) – 0,7;

M_1 – масса пыли, оседающей на труднодоступных для уборки поверхностях в помещении за период времени между генеральными уборками, кг;

M_2 – масса пыли, оседающей на доступных для уборки поверхностях в помещении за период времени между генеральными пылеуборками, кг.

Под труднодоступными для уборки площадями подразумевают такие поверхности в производственных помещениях, очистка которых осуществляется только при генеральных пылеуборках. Доступными для уборки местами являются поверхности, пыль с которых удаляется в процессе текущих пылеуборок (ежесменно, ежесуточно и т. п.).

5.3.1.7. M_k ($k = 1, 2$) рассчитывают по формулам

$$M_1 = M'_1(1 - A)B_1, \quad M_2 = M'_2(1 - A)B_2, \quad (5.27)$$

где $M'_1 = (M_{11} + M_{12} + \dots + M_{1n})$ – масса пыли, выделяющаяся в объем помещения за период между генеральными пылеуборками, кг;

$M_{11} + M_{12} + \dots + M_{1n}$ – масса пыли, выделяемая соответствующей единицей пылящего оборудования за тот же период времени, кг;

$M'_2 = (M_{21} + M_{22} + \dots + M_{2n})$ – масса пыли, выделяющаяся в объем помещения за период времени между текущими пылеуборками, кг;

$M_{21} + M_{22} + \dots + M_{2n}$ – масса пыли, выделяемая соответствующей единицей пылящего оборудования за тот же период времени, кг;

A – доля выделяющейся в объем помещения пыли, которая удаляется вытяжными вентиляционными системами. При отсутствии экспериментальных сведений об A полагают $A = 0$;

B_1, B_2 – доли выделяющейся в объем помещения пыли, оседающей соответственно на труднодоступных и доступных для уборки поверхностях помещения ($B_1 + B_2 = 1$). При отсутствии сведений о коэффициентах B_1 и B_2 допускается полагать $B_1 = 1, B_2 = 0$.

5.3.1.8. M_1 и M_2 могут быть определены экспериментально (или по аналогии с действующими образцами производства) в период максимальной нагрузки оборудования по формуле

$$M_1 = \sum_j (G_{ij}F_{ij})T_i, \quad (5.28)$$

где G_{ij}, F_{ij} – соответственно интенсивность пылеосаждения и площадь для труднодоступных ($i = 1$) и доступных ($i = 2$) участков; j – номер участка пылеосаждения;

T_i – промежуток времени между генеральными ($i = 1$) и текущими ($i = 2$) пылеуборками.

5.3.2. Характеристики сгорания пылепаровоздушных смесей в технологическом аппарате

5.3.2.1. Сгорание пылевоздушной смеси в аппарате может протекать как в режиме медленного, дозвукового горения, так и в режиме детонации. В подавляющем большинстве практических случаев встречается медленный (дефлаграционный) режим горения, к которому относят информацию пп. (5.3.2.2, 5.3.2.3).

5.3.2.2. Основными расчетными (в предположении достаточной стойкости корпуса аппарата к напряжениям разрыва и деформации) характеристиками взрыва пылевоздушных смесей в аппарате считают:

- P_{max} – максимальное давление при сгорании пылевоздушной смеси в аппарате, кПа, определяемое как наибольшее давление при сгорании, достигаемое в объеме аппарата при взрывном горении оптимальной пылевоздушной смеси;
- $(dP/dt)_{max}$ – максимальную скорость нарастания давления при сгорании пылевоздушной смеси в аппарате, кПа/с, определяемую как наибольший наклон зависимости давления при сгорании оптимальной пылевоздушной смеси в аппарате от времени при точечном зажигании в оптимальном месте;
- K_{st} – индекс взрывопожароопасности пыли

$$K_{st} = (dP/dt)_{max} \cdot V^{1/3},$$

где V – объем аппарата, м³.

5.3.2.3. Для не слишком протяженных технологических аппаратов объемом свыше 16 л справедливы эмпирические правила, в соответствии с которыми

$$\begin{aligned} P_{mas1} &= P_{mas2}, \\ K_{st1} &= K_{st2}, \end{aligned} \quad (5.29)$$

где 1, 2 – индексы, относящиеся к двум произвольно выбранным аппаратам. Для аппарата объемом менее 16 л расчетные значения характеристик сгорания пылевоздушных смесей (по результатам испытаний в крупномасштабной емкости) обладают достаточным запасом надежности.

5.3.2.4. Оценка расчетных значений параметров сгорания пылевоздушных смесей для протяженных аппаратов (с отношением максимального габаритного размера к минимальному порядка 5 и более), а

также горения, протекающего в режиме детонации, возможна на основе экспертных заключений.

Пример 5.5.

Данные для расчета.

Рассчитать избыточное давление при сгорании полиэтиленовой пыли в помещении для следующих исходных данных: $M_{вз} = 10$ кг; $M_{ав} = 90$ кг; $F = 0,3$; $H_T = 47 \cdot 10^6$ Дж/кг; $V_{св} = 2000$ м³; $V_{ав} = 20$ м³; $P_в = 1,2$ кг/м³; $T_0 = 298$ К; $\rho_{ст} = 0,1$ кг/м³.

Определяем Z по формуле (5.22)

$$Z = 0,5F = 0,5 \cdot 0,3 = 0,15.$$

Определяем M по формуле (5.23)

$$M = \min \begin{cases} M_{вз} + M_{ав} = 10 + 90 = 100 \text{ кг;} \\ \rho_{ст} V_{ав} Z = 0,1 \frac{20}{0,15} = 14 \text{ кг.} \end{cases}$$

Отсюда следует, что $M = 14$ кг.

Принимая $K_H = 3$ и подставляя исходные данные в выражение для расчетного избыточного давления при сгорании пылевоздушной смеси, получим

$$\Delta P = \frac{M H_T P_0 Z}{V_{св} \rho_в C_p T_0 K_H} = \frac{14 \cdot 4,7 \cdot 10^6 \cdot 101 \cdot 0,15}{2 \cdot 10^3 \cdot 1,2 \cdot 1010 \cdot 298 \cdot 3} = 4,6 \text{ кПа.}$$

5.4. Расчет параметров волны давления при сгорании газопаровоздушных смесей в открытом пространстве

5.4.1. Исходя из рассматриваемого сценария аварии определяют массу m , кг, горючих газов и (или) паров, вышедших в атмосферу из технологического аппарата.

5.4.2. Избыточное давление ΔP , развиваемое при сгорании газопаровоздушных смесей, рассчитывают по формуле, кПа,

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \frac{m_{пр}^{0,33}}{r} + 3 \frac{m_{пр}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{m_{пр}}{r^3} \right), \quad (5.30)$$

где P_0 – атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101 кПа;

r – расстояние от геометрического центра газопаровоздушного облака, м;

$m_{\text{пр}}$ – приведенная масса газа или пара рассчитывается по формуле, кг,

$$m_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{ст}}}{Q_0} m_{\text{гп}} Z, \quad (5.31)$$

где $Q_{\text{ст}}$ – удельная теплота сгорания газа или пара, Дж/кг;

Q_0 – константа, равная $4,52 \cdot 10^6$ Дж/кг;

$m_{\text{гп}}$ – масса горючих газов и (или) паров, поступивших в результате аварии в окружающее пространство, кг;

Z – коэффициент участия, который допускается принимать равным 0,1.

5.4.3. Импульс волны давления i рассчитывают по формуле, Па · с,

$$i = 123 \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r}. \quad (5.32)$$

Пример 5.6. Рассчитать избыточное давление и импульс волны давления при выходе в атмосферу пропана, хранящегося в сферической емкости объемом 600 м^3 на расстоянии 500 м от нее. Сделать выводы о степени разрушения в соответствии с табл. 5.3.

Данные для расчета.

Объем емкости 600 м^3 . Температура $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Плотность сжиженного пропана 530 кг/м^3 . Степень заполнения емкости 80% (по объему). Удельная теплота сгорания $4,6 \cdot 10^7$ Дж/кг. Принимается, что в течение времени, необходимого для выхода сжиженного газа из емкости, весь пропан испарится.

Расчет. Вычисляем приведенную массу $m_{\text{пр}}$ по формуле (5.31)

$$m_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{ст}}}{Q_0} m_{\text{гп}} Z,$$

$$m_{\text{пр}} = \frac{4,6 \cdot 10^7}{4,52 \cdot 10^6} (600 \cdot 530 \cdot 0,8) 0,1 = 2,59 \cdot 10^5 \text{ кг}.$$

Находим избыточное давление ΔP по формуле (5.30)

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \frac{m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right),$$

$$\Delta P = 101 \left(\frac{0,8(2,59 \cdot 10^5)^{0,33}}{500} + \frac{3(2,59 \cdot 10^5)^{0,66}}{500^2} + \frac{5(2,59 \cdot 10^5)}{500^3} \right) =$$

$$= 16,2 \text{ кПа}.$$

Находим импульс волны давления I по формуле (5.32)

$$i = 123 \frac{(2,59 \cdot 10^5)^{0,66}}{500} = 1000 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Таблица 5.3

Степень разрушения коммунально-энергетических
и технологических сетей

Здания и сооружения	Избыточное давление ударной волны, кПа					
	1000 – 200	200 – 100	100 – 50	50 – 30	30 – 20	20 – 10
Жилье, производственные и общественные антисейсмические конструкции	а	б	в	г	д	
Промышленные с металлическим или железобетонным каркасом			а	б	в	в, г
Малоэтажные каменные			а	б	в	г, д
Многоэтажные жилые дома с несущими каменными стенами				а	б, в	г, д
Деревянные					а	а, б
Сооружения и сети коммунально-энергетического хозяйства и связи						
Электростанции				а, б	в	г
Здания фидерных и трансформаторных подстанций распределительных устройств			а, б	в	г	г, д
Подземные резервуары		а, б	в	г	д	
Частично заглубленные резервуары			а, б	в	г	д

Продолжение табл. 5.3

Здания и сооружения	Избыточное давление ударной волны, кПа					
	1000 – 200	200 – 100	100 – 50	50 – 30	30 – 20	20 – 10
Смотровые колодцы и камеры переключения на сетях		в, г	г, д			
Стальные водоводы и трубопроводы различного назначения диаметром до 500 мм		в, д				
Разводящие трубопроводы (чугунные, асбоцементные и др.)		в, г	д			
Наземные трубопроводы		а, б	б, в	в, г	г	д
Обсадные трубы скважин	б, г	г	д			
Насосное оборудование скважин		а	в, б	г	д	
Водонапорные башни			а, б	б, в	в	
Воздушные линии электропередач		а	б	в	г	г, д
Воздушные линии связи			а, б	б		г, д
Кабельные подземные линии	б, г	д				
Антенные устройства			а	б	в	г
Металлические мосты пролетом до: 45 м, 100 – 150 м	а, б	б, в а, в	г д	д г, д		
Железобетонные мосты до: 10 м, 20 – 25 м		а, в а, б	в, г в	д г, д		

Здания и сооружения	Избыточное давление ударной волны, кПа					
	1000 – 200	200 – 100	100 – 50	50 – 30	30 – 20	20 – 10
Деревянные мосты			а	б, в	г	г, д
Железнодорожные пути	а, в	г	д			
Автомобильные дороги с твердым покрытием	в, г					
Метрополитен мелкого заложения	а, б		д			
Машины и оборудо- вание: металлоре- жущие станки		а	в	г	д	
Грузовые автомобили			а	б	в, г	г, д

Условные обозначения: а – полные разрушения, б – сильные разрушения, в – средние разрушения, г – слабые разрушения, д – повреждения.

Контрольные вопросы

1. Исходя из каких предпосылок определяют количество поступивших в помещение веществ, которые могут образовать горючие газозоодушные или парозоодушные смеси?
2. Каким образом определяют расчетное время отключения трубопроводов?
3. Что такое свободный объем помещения и как его определяют?
4. Каким допускается принимать свободный объем помещения, если определить его невозможно?
5. Какую температуру допускается принимать в качестве расчетной при определении плотности газа или паров при расчете избыточного давления, для индивидуальных горючих веществ?
6. Как рассчитать приведенную массу газа или пара при определении избыточного давления, развиваемого при сгорании газопарозоодушных смесей?

6. МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАЗМЕРОВ ЗОН, ОГРАНИЧЕННЫХ НИЖНИМ КОНЦЕНТРАЦИОННЫМ ПРЕДЕЛОМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ ГАЗОВ И ПАРОВ

6.1. Метод расчета размеров зон, ограниченных НКПР газов и паров, при аварийном поступлении горючих газов и паров ненагретых легковоспламеняющихся жидкостей в открытое пространство при неподвижной воздушной среде

6.1.1. Расстояния $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$, $Z_{\text{НКПР}}$, м, для ГГ и ЛВЖ, ограничивающие область концентраций, превышающих НКПР, рассчитывают по формулам:

– для горючего газа

$$X_{\text{НКПР}} = Y_{\text{НКПР}} = 14,6 \left(\frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} C_{\text{НКПР}} \right)^{0,33}; \quad (6.1)$$

$$Z_{\text{НКПР}} = 0,33 \left(\frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} C_{\text{НКПР}} \right)^{0,33}; \quad (6.2)$$

– для паров легковоспламеняющейся жидкости

$$X_{\text{НКПР}} = Y_{\text{НКПР}} = 3,2\sqrt{K} \left(\frac{P_{\text{H}}}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{П}}}{\rho_{\text{П}} P_{\text{H}}} \right)^{0,33}; \quad (6.3)$$

$$Z_{\text{НКПР}} = 0,12 \sqrt{K} \left(\frac{P_{\text{H}}}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{П}}}{\rho_{\text{П}} P_{\text{H}}} \right)^{0,33}, \quad (6.4)$$

где m_{Γ} – масса поступившего в открытое пространство ГГ при аварийной ситуации, кг;

ρ_{Γ} – плотность ГГ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м³;

$m_{\text{П}}$ – масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время полного испарения, но не более 3600 с, кг;

$\rho_{\text{П}}$ – плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м³;

P_{H} – давление насыщенных паров ЛВЖ при расчетной температуре, кПа;

K – коэффициент ($K = T/3600$ для ЛВЖ);

$C_{\text{НКПР}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени ГГ или паров ЛВЖ, % (об.).

6.1.2. Радиус R_6 , м, и высоту Z_6 , м, зоны, ограниченной НКПР газов и паров, вычисляют исходя из значений $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$, $Z_{\text{НКПР}}$.

При этом $R_6 > X_{\text{НКПР}}$, $R_6 > Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_6 > h + R_6$ для ГГ и $Z_6 > Z_{\text{НКПР}}$ для ЛВЖ (h – высота источника поступления газа от уровня земли, м).

Для ГГ геометрически зона, ограниченная НКПР газов, будет представлять собой цилиндр с основанием радиусом R_6 и высотой $h = 2R_6$ при $R_6 < h$ и $h_6 = h + R_6$ при $R_6 > h$, внутри которого расположен источник возможного выделения горючего газа.

Для ЛВЖ геометрически зона, ограниченная НКПР паров, будет представлять собой цилиндр с основанием радиусом R_6 и высотой $h = Z_{\text{НКПР}}$ при высоте источников паров ЛВЖ $h < Z_{\text{НКПР}}$ и $h_6 = h + Z_{\text{НКПР}}$ при $h > Z_{\text{НКПР}}$.

За начало отсчета зоны, ограниченной НКПР газов и паров, принимаются внешние габаритные размеры аппаратов, установок, трубопроводов и т. п.

6.1.3. Во всех случаях значения $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}}$ должны быть не менее 0,3 м для ГГ и ЛВЖ.

Пример 6.1. Определить размеры зоны, ограниченной НКПР паров, при аварийной разгерметизации трубопровода, транспортирующего ацетон.

Данные для расчета.

Трубопровод, транспортирующий ацетон, проложен на открытом пространстве на высоте $h = 0,5$ м от поверхности земли. Трубопровод оснащен ручными задвижками.

Масса паров ацетона, поступивших в открытое пространство за время полного испарения, определена в соответствии с табл. 2 приложения и составляет $m_a = 240$ кг при времени испарения $T = 3600$ с. Максимально возможная температура для данной климатической зоны $t_p = 36$ °С. Плотность паров ацетона P_a при t_p равна $2,29$ кг/м³. Нижний концентрационный предел распространения пламени паров ацетона $C_{\text{НКПР}} = 2,7$ % (об.). Давление насыщенных паров ацетона P_n при t_p равно $48,09$ кПа.

Расчет. Расстояния $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}}$ для ацетона, ограничивающие область концентраций, превышающих НКПР, составят

$$\begin{aligned}
 X_{\text{НКПР}} = Y_{\text{НКПР}} &= 3,2\sqrt{K} \left(\frac{P_{\text{H}}}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}} P_{\text{H}}} \right)^{0,33} = \\
 &= 3,2 \sqrt{\frac{3600}{3600}} \left(\frac{48,09}{2,7} \right)^{0,8} \left(\frac{240}{2,29 \cdot 48,09} \right)^{0,33} = 41,43 \text{ м.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{НКПР}} &= 0,12 \sqrt{K} \left(\frac{P_{\text{H}}}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}} P_{\text{H}}} \right)^{0,33} = \\
 &= 0,12 \sqrt{\frac{3600}{3600}} \left(\frac{48,09}{2,7} \right)^{0,8} \left(\frac{240}{2,29 \cdot 48,09} \right)^{0,33} = 1,55 \text{ м.}
 \end{aligned}$$

Таким образом, граница зоны, ограниченной НКПР паров, по горизонтали будет проходить на расстоянии 41,43 м от обечайки трубопровода, а по вертикали – на высоте $h_6 = Z_{\text{НКПР}} = 1,55$ м от поверхности земли.

Пример 6.2. Определить размеры зоны, ограниченной НКПР газов, при аварийной разгерметизации емкости с метаном на открытом пространстве.

Данные для расчета.

При разгерметизации емкости в атмосферу поступит 20 кг метана. Емкость представляет собой цилиндр с основанием радиусом 1 м и высотой $h_a = 10$ м. Максимально возможная температура для данной климатической зоны $t_p = 30$ °С. Плотность метана ρ_m при t_p равна 0,645 кг/м³. Нижний концентрационный предел распространения пламени метана $C_{\text{НКПР}} = 5,28$ % (об.).

Расчет. Расстояния $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}}$ для метана, ограничивающие область концентраций, превышающих НКПР, составят

$$\begin{aligned}
 X_{\text{НКПР}} = Y_{\text{НКПР}} &= 14,6 \left(\frac{m_{\text{M}}}{\rho_{\text{M}} C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33} = 14,6 \left(\frac{20}{0,645 \cdot 5,28} \right)^{0,33} = \\
 &= 26,18 \text{ м.}
 \end{aligned}$$

$$Z_{\text{НКПР}} = 0,33 \left(\frac{m_{\text{M}}}{\rho_{\text{M}} C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33} = 0,33 \left(\frac{20}{0,645 \cdot 5,28} \right)^{0,33} = 0,59 \text{ м.}$$

Таким образом, для расчетной аварии емкости с метаном геометрически зона, ограниченная НКПР газов, будет представлять собой цилиндр с основанием радиусом $R_6 = 26,18$ м и высотой h_6 .

$$h_6 = h_a + R_6 = 10 + 26,18 = 36,18 \text{ м.}$$

За начало зоны, ограниченной НКПР газов, принимают внешние габаритные размеры емкости.

6.2. Метод расчета размеров зон, ограниченных НКПР газов и паров, при аварийном поступлении горючих газов и паров ненагретых легковоспламеняющихся жидкостей в помещение

Нижеприведенные расчетные формулы принимают для случая

$$P \frac{100 m}{P_{г,л} V_{св}} < 0,5 C_{НКПР},$$

где $C_{НКПР}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени горючего газа или пара, % (об.), и помещений в форме прямоугольного параллелепипеда с отношением длины к ширине не более 5.

6.2.1. Расстояния $X_{НКПР}$, $Y_{НКПР}$ и $Z_{НКПР}$ рассчитывают по формулам

$$X_{НКПР} = K_1 l \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{НКПР}} \right)^{0,5}; \quad (6.5)$$

$$Y_{НКПР} = K_1 b \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{НКПР}} \right)^{0,5}; \quad (6.6)$$

$$Z_{НКПР} = K_3 h \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{НКПР}} \right)^{0,5}, \quad (6.7)$$

где K_1 – коэффициент, принимаемый равным 1,1314 для горючих газов и 1,1958 для легковоспламеняющихся жидкостей;

K_2 – коэффициент, равный единице для горючих газов;

$K_2 = \frac{T}{3600}$ для легковоспламеняющихся жидкостей;

K_3 – коэффициент, принимаемый равным 0,0253 для горючих газов при отсутствии подвижности воздушной среды;

K_3 – коэффициент, принимаемый равным 0,02828 для горючих газов при подвижности воздушной среды

K_3 – коэффициент, принимаемый равным 0,04714 для легковоспламеняющихся жидкостей при отсутствии подвижности воздушной среды;

K_3 – коэффициент, принимаемый равным 0,3536 для легковоспламеняющихся жидкостей при подвижности воздушной среды;

h – высота помещения, м;

δ – допустимые отклонения концентраций при задаваемом уровне значимости $Q(C > \bar{C})$ приведены в табл. 5.2; уровень значимости – вероятность того, что значение концентрации C превысит значение математического ожидания этой случайной величины \bar{C} ;

l, b – соответственно глубина и ширина помещения, м;

C_0 – предэкспоненциальный множитель, % (об), равный:

– при отсутствии подвижности воздушной среды для горючих газов

$$C_0 = 3,77 \cdot 10^3 \frac{m}{\rho_r V_{св}}, \quad (6.8)$$

– при подвижности воздушной среды для горючих газов

$$C_0 = 3 \cdot 10^2 \frac{m}{\rho_r V_{св} v}, \quad (6.9)$$

где v – подвижность воздушной среды, м/с;

При отрицательных значениях логарифмов расстояния $X_{НКПР}$, $Y_{НКПР}$ и $Z_{НКПР}$ принимают равными 0.

6.2.2. Радиус R_6 и высоту Z_6 , м, зоны, ограниченной НКПР газов и паров, вычисляют исходя из значений $X_{НКПР}$, $Y_{НКПР}$ и $Z_{НКПР}$ для заданного уровня значимости Q .

При этом $R_6 > X_{НКПР}$, $R_6 > Y_{НКПР}$ и $Z_6 > h + R_6$ для ГГ и $Z_6 > Z_{НКПР}$ для ЛВЖ (h – высота источника поступления газа от пола помещения для ГГ тяжелее воздуха и от потолка помещения для ГГ легче воздуха, м).

Для ГГ геометрически зона, ограниченная НКПР газов, будет представлять собой цилиндр с основанием радиусом R_6 и высотой $h_6 = 2R_6$ при $R_6 \leq h$ и $h_6 = h + R_6$ при $R_6 > h$, внутри которого расположен источник возможного выделения горючего газа.

Для ЛВЖ геометрически зона, ограниченная НКПР паров, будет представлять собой цилиндр с основанием радиусом R_6 и высотой $Z_6 = Z_{НКПР}$ при высоте источника паров ЛВЖ $h < Z_{НКПР}$ и $Z_6 = h + Z_{НКПР}$ при $h \leq Z_{НКПР}$. За начало отсчета принимают внешние габаритные размеры аппаратов, установок, трубопроводов и т. п.

6.2.3. Во всех случаях значения расстояний $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}}$ должны быть не менее 0,3 м для ГГ и ЛВЖ.

Пример 6.3. Определить размеры зоны, ограниченной НКПР паров, образующейся при аварийной разгерметизации аппарата с ацетоном, при работающей и неработающей вентиляции.

Данные для расчета.

В центре помещения размерами 40×40 м и высотой $h = 3$ м установлен аппарат с ацетоном. Аппарат представляет собой цилиндр с основанием диаметром $d_a = 0,5$ м и высотой $h_a = 1$ м, в котором содержится 25 кг ацетона. Расчетная температура в помещении $t_p = 30$ °С. Плотность паров ацетона ρ_a при t_p равна 2,33 кг/м³. Давление насыщенных паров ацетона ρ_n при t_p равно 37,73 кПа. Нижний концентрационный предел распространения пламени $C_{\text{НКПР}} = 2,7$ % (об.). В результате разгерметизации аппарата в помещение поступит 25 кг паров ацетона за время $T = 208$ с. При работающей общеобменной вентиляции подвижность воздушной среды в помещении $v = 0,1$ м/с.

Расчет. Допускаемые значения отклонений концентрации δ при уровне значимости $Q = 0,05$, будут равны: 1,27 – при работающей вентиляции; 1,25 – при неработающей вентиляции ($v = 0$).

Предэкспоненциальный множитель C_0 будет равен :

– при работающей вентиляции

$$C_0 = C_n \left(\frac{m100}{C_n P_a V_{\text{св}}} \right)^{0,46} = 37,36 \left(\frac{25 \cdot 100}{37,36 \cdot 2,33 \cdot 3840} \right)^{0,46} =$$

$$= 3,93 \text{ \% (об.)};$$

$$C_n = 100 \frac{P_n}{P_0} = 100 \frac{37,73}{101} = 37,36 \text{ \% (об.)};$$

$$V_{\text{св}} = 0,8 V_{\text{п}} = 0,8 \cdot 40 \cdot 40 \cdot 3 = 3840 \text{ м}^3;$$

– при неработающей вентиляции

$$C_0 = C_n \left(\frac{m100}{C_n P_a V_{\text{св}}} \right)^{0,41} = 337,36 \left(\frac{25 \cdot 100}{37,36 \cdot 2,33 \cdot 3840} \right)^{0,41} =$$

$$= 5,02 \text{ \% (об.)}.$$

Расстояния $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}}$ составят:

– при работающей вентиляции

$$X_{\text{НКПР}} = K_1 l \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} = 1,1958 \cdot 40 \left(\frac{208}{3600} \ln \frac{1,27 \cdot 3,93}{2,7} \right)^{0,5} = 9,01 \text{ м};$$

$$Y_{\text{НКПР}} = K_1 b \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} = 1,1958 \cdot 40 \left(\frac{208}{3600} \ln \frac{1,27 \cdot 3,93}{2,7} \right)^{0,5} = 9,01 \text{ м};$$

$$Z_{\text{НКПР}} = K_3 h \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} = 0,3536 \cdot 3 \left(\frac{208}{3600} \ln \frac{1,37 \cdot 3,93}{2,7} \right)^{0,5} = 0,2 \text{ м};$$

– при неработающей вентиляции

$$X_{\text{НКПР}} = 1,1958 \cdot 40 \left(\frac{208}{3600} \ln \frac{1,25 \cdot 5,02}{2,7} \right)^{0,5} = 10,56 \text{ м};$$

$$Y_{\text{НКПР}} = 1,1958 \cdot 40 \left(\frac{208}{3600} \ln \frac{1,25 \cdot 5,02}{2,7} \right)^{0,5} = 10,56 \text{ м};$$

$$Z_{\text{НКПР}} = 0,04714 \cdot 3 \left(\frac{208}{3600} \ln \frac{1,25 \cdot 5,02}{2,7} \right)^{0,5} = 0,03 \text{ м}.$$

Таким образом, для ацетона геометрическая зона, ограниченная НКПР паров, будет представлять собой цилиндр с основанием радиусом $R_г$ и высотой $Z_г = h_a + Z_{\text{НКПР}}$, так как $h_a > Z_{\text{НКПР}}$:

– при работающей вентиляции

$$Z_г = 1 + 0,2 = 1,2 \text{ м}, \quad R_г = 9,01 \text{ м};$$

– при неработающей вентиляции

$$Z_г = 1 + 0,03 = 1,03 \text{ м}, \quad R_г = 10,56 \text{ м}.$$

За начало отсчета принимают внешние габаритные размеры аппарата.

Пример 6.4. Определить размеры зоны, ограниченной НКПР газов, образующейся при аварийной разгерметизации газового баллона с метаном, при работающей и неработающей вентиляции.

Данные для расчета.

На полу помещения размерами 13×13 м и высотой $h_{\text{п}} = 3$ м находится баллон с 0,28 кг метана. Газовый баллон имеет высоту $h_г = 1,5$ м. Расчетная температура в помещении $t_{\text{р}} = 30$ °С. Плотность метана $\rho_{\text{м}}$ при $t_{\text{р}}$ равна 0,645 кг/м³. Нижний концентрационный предел распро-

странения пламени метана $C_{\text{НКПР}} = 5,28 \%$ (об.). При работающей общеобменной вентиляции подвижность воздушной среды в помещении $v = 0,1$ м/с.

Расчет. Допустимые отклонения концентраций при уровне значимости $Q = 0,05$ будут равны: 1,37 – при работающей вентиляции; 1,38 – при неработающей вентиляции ($v = 0$).

Предэкспоненциальный множитель C_0 будет равен:

– при работающей вентиляции

$$C_0 = 3 \cdot 10^2 \frac{m}{\rho_M V_{\text{св}} v} = 3 \cdot 10^2 \frac{0,28}{0,645 \cdot 0,8 \cdot 13 \cdot 13 \cdot 3 \cdot 0,1} =$$

$$= 3,21\% \text{ (об.)};$$

– при неработающей вентиляции

$$C_0 = 3,77 \cdot 10^3 \frac{m}{\rho_M V_{\text{св}}} = 3,77 \cdot 10^3 \frac{0,28}{0,645 \cdot 0,8 \cdot 13 \cdot 13 \cdot 3} =$$

$$= 4,04 \% \text{ (об.)}.$$

Расстояния $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}}$ составят:

– при работающей вентиляции

$$X_{\text{НКПР}} = K_1 l \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} = 1,1314 \cdot 13 \left(1 \cdot \ln \frac{1,37 \cdot 3,21}{5,28} \right)^{0,5} < 0;$$

$$Y_{\text{НКПР}} = K_1 b \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} = 1,1314 \cdot 13 \left(1 \cdot \ln \frac{1,37 \cdot 3,21}{5,28} \right)^{0,5} < 0;$$

$$Z_{\text{НКПР}} = K_3 h \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} = 0,02828 \cdot 3 \left(1 \cdot \ln \frac{1,37 \cdot 3,21}{5,28} \right)^{0,5} < 0,$$

следовательно, $X_{\text{НКПР}}$, $Y_{\text{НКПР}}$ и $Z_{\text{НКПР}} = 0$;

– при неработающей вентиляции

$$X_{\text{НКПР}} = K_1 l \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} = 1,1314 \cdot 13 \left(1 \cdot \ln \frac{1,38 \cdot 4,04}{5,28} \right)^{0,5} =$$

$$= 3,34 \text{ м};$$

$$Y_{\text{НКПР}} = K_1 b \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} = 1,1314 \cdot 13 \left(1 \cdot \ln \frac{1,38 \cdot 4,04}{5,28} \right)^{0,5} =$$

$$= 3,34 \text{ м};$$

$$Z_{\text{НКПР}} = K_3 h \left(K_2 \ln \frac{\delta C_0}{C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,5} = 0,0253 \cdot 3 \left(1 \cdot \ln \frac{1,38 \cdot 4,04}{5,28} \right)^{0,5} =$$

$$= 0,02 \text{ м}.$$

Таким образом, для метана при неработающей вентиляции геометрически зона, ограниченная НКПР газов, будет представлять собой цилиндр с основанием радиусом $R_6 = 3,34$ м и высотой $h_a = h + R_6 = 3 + 3,34 = 6,34$ м. Ввиду того что h_6 расчетное больше высоты помещения $h_{п} = 3$ м, за высоту зоны, ограниченной НКПР газов, принимаем высоту помещения $h_6 = 3$ м.

Контрольные вопросы

1. Что такое нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР) для газов?
2. Как определить расстояния $X_{НКПР}$, $Y_{НКПР}$ и $Z_{НКПР}$ для горючих газов при их аварийном поступлении в пространство, ограниченное областью концентраций, превышающих НКПР?
3. Как определить расстояния $X_{НКПР}$, $Y_{НКПР}$ и $Z_{НКПР}$ для легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ) при аварийном поступлении ЛВЖ в пространство, ограниченное областью концентраций, превышающих НКПР?
4. Что представляет собой геометрически зона для горючих газов, ограниченная НКПР газов?
5. Что представляет собой геометрически зона для легковоспламеняющихся жидкостей, ограниченная НКПР газов?
6. Что принимают за начало отсчета зоны, ограниченной НКПР газов?
7. Что принимают за начало отсчета зоны, ограниченной НКПР паров ЛВЖ?
8. Как определить размеры зоны, ограниченной НКПР горючих газов, при аварийном поступлении ГГ в помещение при работающей и неработающей общеобменной вентиляции?
9. Как определить размеры зоны, ограниченной НКПР паров ЛВЖ, при аварийном поступлении паров ЛВЖ в помещение при работающей и неработающей общеобменной вентиляции?

7. ПЛАН ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

7.1. Общие положения. Термины и определения

Авария – разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на ОПО, неконтролируемый взрыв и (или) выброс опасных веществ.

Аварийная ситуация – состояние потенциально опасного объекта, характеризующееся нарушением пределов и условий безопасной эксплуатации, не перешедшее в аварию, при котором все неблагоприятные влияния источников опасности на персонал, население и окружающую среду удерживаются в приемлемых пределах посредством соответствующих технических средств, предусмотренных проектом.

Взрыв – кратковременный процесс быстрого физико-химического превращения веществ с выделением большого количества энергии в небольшом объеме.

Пожар – неконтролируемый процесс горения, сопровождающийся уничтожением материальных ценностей и создающий опасность для жизни людей.

Горение – это химическая реакция окисления, сопровождающаяся выделением большого количества тепла и обычно свечением.

Аварийные ситуации (АС) могут быть вызваны:

- природными катаклизмами (землетрясение, наводнение, тайфун, извержение вулкана, атмосферное электричество и т. д.);
- техногенными причинами (отказ, поломка, повреждение технических систем и транспорта).

Большую долю в возникновении техногенных аварийных ситуаций занимает антропогенный фактор:

- ошибочные действия персонала промышленных предприятий, водителей транспортных средств, населения;
- несанкционированные и террористические действия людей.

Для снижения вероятности возникновения природных аварийных ситуаций соответствующими службами проводится прогнозирование:

- погодных условий,
- геомагнитных явлений,
- гидрологической обстановки и других явлений с оповещением населения и администрации о возможности создания аварийной ситуации.

Для снижения вероятности возникновения аварийных ситуаций техногенного характера проводятся работы:

- по повышению надежности технологического оборудования и транспортных средств;
- созданию систем диагностики состояния опасных агрегатов;
- оснащению объектов производства системами пожарной автоматике.

В соответствии с требованиями ст. 9 ФЗ -116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» организации, эксплуатирующие ОПО, обязаны осуществлять мероприятия по локализации и ликвидации последствий аварий на ОПО, оказывать содействие государственным органам в расследовании причин аварий.

В целях обеспечения готовности к действию по локализации и ликвидации последствий аварий организация, эксплуатирующая ОПО, обязана планировать и осуществлять мероприятия по локализации и ликвидации последствий аварий на ОПО.

Вот та отправная точка, с которой стоит начать рассмотрение темы «Локализация и ликвидация последствий аварий на ОПО».

7.2. Назначение Плана локализации и ликвидации аварий (ПЛА) и Плана локализации и ликвидации аварийных ситуаций (ПЛАС)

ПЛА и ПЛАС разрабатываются с целью:

- планирования действий персонала ОПО и специализированных служб на различных уровнях развития ситуации;
- определения готовности организации к локализации и ликвидации аварий на ОПО;
- выявления достаточности принятых мер по предупреждению аварий на объекте;
- разработки мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на ОПО.

ПЛА и ПЛАС основываются:

- на прогнозировании сценариев возникновения и развития аварий;
- постадийном анализе сценариев развития аварий;

- оценке достаточности принятых (для действующих ОПО) или планируемых (для проектируемых и строящихся) мер, препятствующих возникновению и развитию аварий;
- на анализе действий персонала ОПО, специализированных служб при локализации и ликвидации аварий на соответствующих стадиях их развития.

7.3. Содержание и структура типового плана ликвидации аварии

План ликвидации аварии имеет следующую структуру:

- а) титульный лист;
- б) оглавление;
- в) ПЛА уровня «А»;
- г) ПЛА уровня «Б»;
- д) приложения, в состав которых входят:
 - схема оповещения об аварии;
 - список оповещения работников ОПО, их подразделений и сторонних организаций, которые немедленно извещаются диспетчером организации об аварии;
 - инструкции по безопасной остановке технологического процесса;
 - действия ответственного руководителя и работников ОПО по локализации и ликвидации аварий и их последствий;
 - список инструментов, материалов, приспособлений и средств индивидуальной защиты;
 - порядок изучения ПЛА и организация учебных занятий;
 - расчетно-пояснительная записка к ПЛА, которая оформляется в виде отдельной книги.

7.4. Согласование и утверждение плана ликвидации аварии

ПЛА согласовывается с руководителями всех специализированных служб, задействованных в соответствии с оперативной частью ПЛА в работах по локализации и ликвидации аварий.

ПЛА вводится в действие приказом по организации.

ПЛА пересматривается и переутверждается не реже одного раза в пять лет, а также после аварии по результатам технического расследования причин аварии.

7.5. Разработка плана ликвидации аварии

При разработке ПЛА организацией выполняется анализ опасности аварий для данного ОПО, который проводится поблочно на основании физико-химических свойств веществ, обращающихся в оборудовании, аппаратурного оформления, режимов работы оборудования, а также с учетом анализа аварий, имевших место на данном или аналогичном объекте.

Результаты анализа опасности аварии на ОПО представляются в расчетно-пояснительной записке РПЗ к ПЛА.

При определении основных факторов, способствующих возникновению и развитию аварии, особое внимание уделяется:

- техническому состоянию оборудования;
- близости параметров технологического процесса к критическим значениям;
- выполнению требований проектной документации, технологических регламентов на пуск и остановку оборудования ОПО.

В качестве основных причин, вызывающих возникновение аварии, рекомендуется рассматривать:

- ошибки производственного персонала;
- выход параметров за критические значения;
- отказы оборудования;
- внешние воздействия природного и техногенного характера;
- террористические акты.

Определение возможных сценариев возникновения и развития аварий проводится исходя:

- из анализа произошедших аварий;
- свойств обращающихся опасных веществ;
- аппаратурного оформления и компоновочных решений блока;
- технологических параметров процесса;
- места возникновения аварии (помещение или открытое пространство).

Краткое описание сценария включает в себя :

- наименование аварии;
- стадии ее развития;

- воздействие поражающих факторов на персонал, оборудование, здания и сооружения, окружающую среду.

Каждая авария может иметь несколько стадий развития и при определенных условиях может быть локализована или перейти на более высокий уровень (с большей степенью действия поражающих факторов).

Для каждой стадии развития аварии устанавливается соответствующий уровень «А», «Б», «В».

На уровне «А» авария характеризуется ее развитием в пределах одного ОПО или его составляющей.

На уровне «Б» авария характеризуется ее выходом за пределы ОПО или его составляющей и развитием ее в пределах границ предприятия.

На уровне «В» авария характеризуется развитием и выходом ее поражающих факторов за пределы границ предприятия. Авария уровня «В» в оперативной части ПЛА не рассматривается.

Оценку вероятности возникновения и анализ возможных сценариев развития аварий рекомендуется проводить, используя метод анализа «дерево событий». Для каждого сценария указываются поражающие факторы, количество опасных веществ, участвующих в аварии и создании поражающих факторов.

Расчет вероятных зон поражения ведут для поражающих факторов, которые имеют место при аварии. Основные результаты расчета рекомендуется приводить в форме таблицы.

По результатам расчетов строятся ситуационные планы, по которым определяется возможность перехода аварии на более высокий уровень. На ситуационном плане для каждой конкретной аварии указываются размеры зон действия поражающих факторов (ударная волна, тепловое воздействие на персонал и оборудование, токсическое поражение, химические ожоги).

Для каждой возможной стадии развития рассматриваемых аварий проводится *анализ условий перехода аварии на следующий уровень*, указываются оптимальные способы и средства их предупреждения и локализации, после чего проводится анализ существующей системы противоаварийной защиты и ее соответствия требованиям промышленной безопасности.

Выводы содержат:

- краткую характеристику опасности ОПО с указанием наиболее опасных сценариев развития аварий;
- информацию о соответствии требованиям промышленной безопасности;
- сведения о наличии на объекте необходимых средств индивидуальной и коллективной защиты, средств локализации и ликвидации аварий, наличии на объекте специализированных служб, которые способны провести локализацию аварии на уровне «А», а также договора с профессиональным аварийно-спасательным формированием.

ПЛА уровня «А»

ПЛА уровня «А» разрабатывается со следующей структурой:

Краткая характеристика опасности технологических блоков, входящих в состав ОПО (цеха, отделения, установки производственного участка и другие объекты), в которой представляются степень опасности и характер воздействия веществ на организм человека:

- индивидуальные средства защиты;
- количество опасных веществ в блоке, участвующих в создании поражающих факторов для наиболее опасного по последствиям сценария аварии;
- поражающие факторы аварии (ударная волна, тепловое излучение, токсическое поражение);
- размер зон действия поражающих факторов для наиболее опасного по последствиям сценария развития аварии.

Принципиальные технологические схемы блоков, входящих в состав ОПО (структурные подразделения, цеха, отделения, установки производственного участка).

Планы расположения основного технологического оборудования блоков, входящих в состав ОПО, на которых указываются места расположения основного технологического оборудования; границы технологических блоков; отсекающая запорная арматура; средства противоаварийной защиты; пульты (устройства) управления; автоматические извещатели, средства связи и оповещения, а также инструменты, материалы, средства индивидуальной защиты, имеющие непосредственное отношение к локализации и ликвидации аварии; эвакуационные выходы, маршруты эвакуации, пути подъезда; места установки и маневрирования спецтехники; убежища и места укрытий.

На план расположения оборудования технологических блоков могут дополнительно наноситься места наиболее вероятного возникновения аварий, размеры и границы зон действия поражающих факторов и другие характеристики.

Оперативная часть ПЛА уровня «А» разрабатывается по каждому блоку ОПО для руководства действиями руководящего персонала, работников ОПО, членов специализированных служб.

В оперативной части ПЛА приводятся место возникновения аварии и стадии ее развития, опознавательные признаки аварии, способы и средства локализации и ликвидации аварии, исполнители и порядок их действий.

При описании действий работников ОПО рекомендуется особо подчеркнуть те из них, которые не допускают промедления и требуют немедленного исполнения.

При описании действий специализированных служб рекомендуется указывать ориентировочное время их прибытия и развертывания.

Для каждой аварии определяются последовательность введения в действие систем противоаварийной защиты, отключения аппаратов и механизмов, электроэнергии и других энергоносителей, режим работы вентиляции и систем очистки воздуха, порядок использования средств спасения людей, локализации и ликвидации аварий. При этом следует учитывать влияние выполняемых переключений и отключений на работу систем жизнеобеспечения и других систем, которые являются существенными при ликвидации аварии.

ПЛА уровня «Б»

ПЛА уровня «Б» разрабатывается для руководства действиями руководящего персонала, работников ОПО, членов специализированных служб и иных служб, привлекаемых в случае необходимости для локализации аварий, предупреждения их распространения за пределы рассматриваемого ОПО.

В ПЛА уровня «Б» включаются вместе с перечисленными разделами ПЛА уровня «А» дополнительно следующие разделы:

- а) оперативная часть ПЛА уровня «Б»;
- б) блок-схема технологического объекта;
- в) ситуационный план технологического объекта, на котором рекомендуется указать места:

- расположения структурных подразделений, цехов, установок организации;
- скопления опасных продуктов с указанием наименования и массы продукта;
- установки межпроизводственной отсекающей арматуры, ее тип и основные технические характеристики;
- нахождения средств противоаварийной защиты;
- расположения пунктов или средств связи и оповещения;
- установки и маневрирования спецтехники;
- наиболее вероятного возникновения аварии;
- эвакуационные выходы и маршруты эвакуации, убежища и места укрытий, пути подъезда;
- зоны возможного поражения обслуживающего персонала организации с учетом распространения взрывных и ударных волн;
- направления движения взрывоопасных и токсичных облаков.

Действия ответственного руководителя, работников ОПО по локализации и ликвидации аварий и их последствий.

1. Руководство работами по локализации и ликвидации аварий, спасению людей и снижению воздействия опасных факторов осуществляется ответственным руководителем.

2. Для принятия эффективных мер по локализации и ликвидации аварии ответственным руководителем создается командный пункт (оперативный штаб), функциями которого являются:

- сбор и регистрация информации о ходе развития аварии и принятых мерах по ее локализации и ликвидации;
- текущая оценка информации и принятие решений по оперативным действиям в зоне действия поражающих факторов аварии и за ее пределами;
- координация действий персонала ОПО и всех привлеченных подразделений и служб, участвующих в локализации и ликвидации аварии.

3. Лица, участвующие в ликвидации аварий, информируют ответственного руководителя о ходе выполнения его распоряжений.

Ответственным руководителем назначается:

- на уровне «А» развития аварии – начальник структурного подразделения ОПО (цеха, производственного участка, установки); до его прибытия на место аварии – начальник смены, сменный мастер;

– на уровне «Б» развития аварии – руководитель организации (должностное лицо, в обязанности которого входит обеспечение выполнения требований промышленной безопасности при эксплуатации ОПО); до его прибытия на место аварии – диспетчер организации.

Мероприятия, проводимые ответственным руководителем:

1. На уровне «А» развития аварии:

– оценивается обстановка, выявляются количество и местонахождение людей, застигнутых аварией, принимаются меры по оповещению работников ОПО и населения (при необходимости) об аварии;

– принимаются меры по оцеплению района аварии и зоны действия поражающих факторов;

– принимаются неотложные меры по организации спасения людей, локализации и ликвидации аварии;

– обеспечивается вывод из опасной зоны людей, которые не принимают непосредственного участия в локализации и ликвидации аварии;

– ограничивается доступ людей и транспортных средств в зону действия поражающих факторов;

– к аварийной остановке производства привлекаются только те лица из числа работников ОПО, которые подготовлены, оснащены в соответствии с табелем технического оснащения членов нештатного аварийно-спасательного формирования и аттестованы в установленном порядке;

– контролируются правильность действий работников ОПО, а в случае необходимости – действия специализированных, пожарных, медицинских подразделений по спасению людей, локализации и ликвидации аварий на производстве и выполнение распоряжений;

– информируются о ходе и характере аварии, о пострадавших при спасательных работах руководство ОПО, территориальные органы Ростехнадзора России, Государственной инспекции труда, территориальные органы МЧС России, а при необходимости – органы местного самоуправления.

2. На уровне «Б» развития аварии дополнительно к действиям ответственного руководителя на уровне «А» развития аварии осуществляется:

– в случае изменения расположения командного пункта оповещаются все лица, привлекаемые к работе по локализации и ликвидации аварии;

– проводится руководство действиями работников ОПО, специализированных, пожарных, медицинских подразделений по спасению людей, локализации и ликвидации аварии на объекте и контролируется выполнение распоряжений;

– в случае необходимости вводятся в действие резервные системы жизнеобеспечения, сигнализации и противоаварийной защиты;

– обеспечивается информирование в установленном порядке должностных лиц, ведомств и организаций о результатах выполненного при разработке ПЛА анализа опасности организации, о возможности проявления действия опасных факторов аварии за пределами территории организации, о характере и потенциальной тяжести происшествия;

– обеспечивается взаимодействие с органами исполнительной власти субъекта Российской Федерации (комиссией по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций) и органами местного самоуправления.

Список инструментов, материалов, приспособлений и средств индивидуальной защиты составляется на основании расчета необходимых сил и средств для ликвидации аварий.

Порядок изучения ПЛА и организация учебных занятий:

– после внесения в ПЛА изменений и дополнений предусматривается их изучение;

– в течение года в структурных подразделениях в каждой смене по возможным авариям, предусмотренным оперативной частью ПЛА уровня «А», проводятся учебные занятия согласно графику учебных занятий;

– не реже одного раза в год по одной или нескольким позициям оперативной части ПЛАС уровня «Б» в разные периоды года и в разное время суток в структурных подразделениях предусматривается проведение учебных занятий согласно графику учебных занятий;

– рекомендуется предусматривать проверку знаний ПЛА квалификационной (экзаменационной) комиссией организации при допуске рабочих и руководящих работников и специалистов к самостоятельной работе, при периодической проверке знаний, а также во время учебных тревог и учебно-тренировочных занятий;

– внеочередная проверка знаний ПЛА проводится при внесении изменений в ПЛА, при переводе работников организации на другое рабочее место, в случае их неквалифицированных действий при проведении учебной тревоги, а также по предложениям территориальных органов Ростехнадзора.

Контрольные вопросы

1. С какой целью разрабатывается план ликвидации аварий?
2. На чем основывается план ликвидации аварий?
3. Что должен содержать план ликвидации аварий?
4. Что должно входить в состав Приложения плана ликвидации аварий?
5. С кем согласовывается план ликвидации аварий, кто его утверждает и каким документом он вводится в действие?

8. РАЗРАБОТКА ПАСПОРТА БЕЗОПАСНОСТИ ОПАСНОГО ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕКТА

В 90-х годах XX века в период болезненного перехода России к рыночным отношениям, осуществления фундаментальных экономических реформ и массовой приватизации объектов промышленного производства значительное количество собственников объектов экономики, представляющих потенциальную опасность для населения, обусловленную обращением на указанных объектах опасных веществ, пренебрегало вопросами обеспечения промышленной безопасности и защиты населения (территорий) от чрезвычайных ситуаций, ставя во главу угла получение высоких прибылей (пример с ГНС в г. Владимире).

При этом для населения России угроза функционирования потенциально опасных объектов была обусловлена значительным их количеством (свыше 2500 химически опасных объектов, более 1500 ядерно и радиационно опасных объектов, около 8000 пожаро- и взрывоопасных объектов, более 29000 напорных гидротехнических сооружений), проживанием в зонах возможного воздействия поражающих факторов аварий свыше 100 млн жителей страны, а также значительным износом основных производственных фондов, низким уровнем трудовой и технологической дисциплины.

Органы государственной власти Российской Федерации, понимая всю пагубность сложившейся ситуации, в 1997 году Федеральным законом № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» законодательно закрепили требования, обеспечивающие защищенность жизненно важных интересов личности и общества от промышленных аварий, способных привести к широкомасштабным чрезвычайным ситуациям.

8.1. Необходимость и цели разработки паспорта безопасности

Статьей 14 Федерального закона от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ была установлена обязанность разработки в составе проектной документации на строительство, расширение, реконструкцию, техническое перевооружение, консервацию и ликвидацию ОПО деклараций промышленной безопасности, которые должны содержать:

- результаты всесторонней оценки риска аварий и связанных с ними угроз;
- анализ достаточности принятых мер по предупреждению аварий, обеспечению готовности организации к эксплуатации ОПО в соответствии с требованиями промышленной безопасности, а также к локализации и ликвидации последствий аварий на ОПО;
- перечень и характеристику мероприятий, направленных на снижение масштаба последствий аварий и размера ущерба, нанесенного в случае аварий на ОПО.

При этом декларируемые объекты по запросам граждан и общественных организаций обязаны представить Информационный лист декларации паспорта безопасности (ПБ) ОПО, являющийся приложением к Декларации и содержащий наряду с иными сведениями информацию об обращаемых на ОПО опасных веществах и их количестве, сведения о масштабах и последствиях возможных аварий, мерах безопасности, а также сведения о способах оповещения и необходимых действиях населения при возникновении аварий.

На объектах, не подлежащих декларированию ПБ, какие-либо документы, содержащие информацию о потенциальной опасности указанных объектов и предназначенные для информирования населения о возможных угрозах техногенного характера, законодательством не предусмотрены.

Таким образом, в конце 90-х годов возникла ситуация, при которой руководители муниципальных образований и субъектов Российской Федерации, а также федеральных органов исполнительной власти представляли всю степень опасности для населения декларируемых ОПО, но при этом не в полной мере владели информацией об опасностях иных потенциально опасных объектов.

Впервые паспортизация безопасности критически важных и потенциально опасных объектов введена согласно решению совместного заседания Совета Безопасности РФ и президиума Государственного совета РФ «О мерах по обеспечению защищенности критически важных для национальной безопасности объектов инфраструктуры и населения страны от угроз техногенного, природного характера и террористических проявлений» (протокол от 13 ноября 2003 г. № 4).

При этом следует отметить, что сведения, изложенные в паспортах безопасности, предполагается использовать в качестве исходных материалов для составления паспортов безопасности муниципальных образований и территорий субъектов Российской Федерации, необходимость разработки которых определена приказом МЧС России от 25.10.2004 г. № 484.

Цели разработки паспорта безопасности:

- определение показателей степени риска ЧС для персонала опасного объекта и проживающего вблизи населения;
- определение возможности возникновения ЧС на опасном объекте;
- оценка возможных последствий ЧС на опасном объекте;
- оценка возможного воздействия ЧС, возникших на соседних опасных объектах;
- оценка состояния работ по предупреждению ЧС и готовности к ликвидации ЧС на опасном объекте;
- разработка мероприятий по снижению риска и смягчению последствий ЧС на опасном объекте.

8.2. Разработка паспорта безопасности на потенциально опасных объектах

ГОСТ Р 22.0.02-94 «БЧС. Термины и определения основных понятий» определяет ***потенциально опасный объект*** как объект, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят или транспортируют радиоактивные, пожаро- и взрывоопасные, опасные химические и биологические вещества, создающие реальную угрозу возникновения источника чрезвычайной ситуации.

Статьей 48.1 Градостроительного кодекса РФ от 29.12.2004 г. (с изменениями) определены критерии отнесения объектов *к особо опасным и технически сложным*. Таковыми являются:

1. Объекты использования атомной энергии (в том числе ядерные установки, пункты хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ).

2. Гидротехнические сооружения первого и второго классов, устанавливаемые в соответствии с законодательством о безопасности гидротехнических сооружений.

3. Линейно-кабельные сооружения связи и сооружения связи, определяемые в соответствии с законодательством Российской Федерации.

4. Линии электропередачи и иные объекты электросетевого хозяйства напряжением 330 кВ и более.

5. Объекты космической инфраструктуры.

6. Аэропорты и иные объекты авиационной инфраструктуры.

7. Объекты инфраструктуры железнодорожного транспорта общего пользования.

8. Метрополитены.

9. Морские порты, за исключением морских специализированных портов, предназначенных для обслуживания спортивных и прогулочных судов.

10. Автомобильные дороги общего пользования федерального значения и относящиеся к ним транспортные инженерные сооружения.

11. Опасные производственные объекты в соответствии с ФЗ от 21.07.1997 г. № 116.

В приказе МЧС России от 28.02.2003 г. № 105 «Об утверждении Требований по предупреждению ЧС на потенциально опасных объектах и объектах жизнеобеспечения» дано определение потенциально опасных объектов, к которым отнесены объекты, на которых используются, производятся, перерабатываются, хранятся и транспортируются пожаровзрывоопасные, опасные химические и биологические вещества.

С точки зрения законодательной практики отнесение опасных объектов к опасным производственным, потенциально опасным или к особо опасным и технически сложным объектам *не является корректным и правомочным*.

К опасным объектам, владельцы которых должны осуществлять обязательное страхование, относятся расположенные на территории Российской Федерации и подлежащие регистрации в государственном реестре в соответствии с законодательством о промышленной безопасности ОПО или внесению в Российский регистр гидротехнических сооружений в соответствии с законодательством о безопасности гидротехнических сооружений:

1. Объекты потенциальной опасности, на которых:

а) получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются опасные вещества (воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные, высокотоксичные, а также представляющие опасность для окружающей природной среды), в том числе автозаправочные станции с заправкой сжиженными углеводородными газами и жидким моторным топливом;

б) используется оборудование, работающее под давлением более 0,07 МПа или при температуре нагрева воды более 115 °С;

в) используются стационарно установленные грузоподъемные механизмы, эскалаторы (в том числе лифты и эскалаторы в многоквартирных домах, а также на объектах торговли, общественного питания, в административных учреждениях и на иных объектах, связанных с обеспечением жизнедеятельности граждан), канатные дороги, фуникулеры;

г) получают расплавы черных и цветных металлов и сплавы на основе этих расплавов;

д) ведутся горные работы, работы по обогащению полезных ископаемых, а также работы в подземных условиях.

2. Гидротехнические сооружения – плотины, здания электростанций, водосбросные, водоспускные и водовыпускные сооружения, туннели, каналы, насосные станции, судоходные шлюзы, судоподъемники, сооружения, предназначенные для защиты от наводнений берегов водохранилищ, берегов и дна русел рек, сооружения (дамбы), ограждающие хранилища жидких отходов промышленных и сельскохозяйственных организаций, устройств от размывов на каналах и другие сооружения, предназначенные для использования водных ресурсов и предотвращения негативного воздействия вод и жидких отходов.

Эта статья определяет перечень опасных объектов, владельцы которых обязаны страховать свою ответственность за возможное причинение вреда в результате аварии на них. Закон от 27.07.2010 г. № 225-ФЗ «О развитии положений законов о промышленной безопасности ОПО и безопасности гидротехнических сооружений» к опасным объектам относит ОПО и гидротехнические сооружения, внесенные в соответствующий государственный реестр.

8.3. Особенности разработки паспорта безопасности

Разработку паспорта безопасности опасного объекта (ПБОО) должен осуществлять владелец опасного объекта (эксплуатирующая объект организация) либо своими силами, либо с привлечением сторонней организации.

Паспорт безопасности опасного объекта разрабатывается в двух экземплярах, утверждается руководителем ОПО и согласовывается с Главным управлением МЧС России по субъекту Российской Федерации. Первый экземпляр остается на объекте, а второй направляется в Главное управление МЧС России по месту расположения объекта.

Паспорт составляется по состоянию на начало января текущего года и дополняется или корректируется по мере необходимости с внесением изменений во все экземпляры.

Паспорт разрабатывается на основе типового паспорта, утвержденного приказом МЧС России от 04.11.2004 г. № 506, который устанавливает основные требования к структуре, составу и оформлению паспорта безопасности опасного объекта.

8.4. Содержание типового паспорта безопасности

Паспорт безопасности опасного объекта должен содержать:

- титульный лист;
- раздел «Общая характеристика опасного объекта»;
- раздел «Показатели степени риска чрезвычайных ситуаций»;
- раздел «Характеристика аварийности и травматизма»;
- раздел «Характеристика организационно-технических мероприятий, обеспечивающих безопасность объекта и готовность к ликвидации чрезвычайных ситуаций»;
- лист, содержащий подписи разработчиков ПБОО.

Подробное описание и содержание разделов в удобной табличной форме даны в Приказе МЧС от 4 ноября 2004 г. № 506, а также приводятся в приложениях № 2-5 Методических указаний по разработке ПБОО.

Краткая характеристика разделов ПБОО:

1. Титульный лист – образец титульного листа дан в самом начале Приложения к Приказу МЧС от 4 ноября 2004 г. № 506 и содержит сведения об утверждении и согласовании документа, наименование объекта и эксплуатирующей организации, а также населенный пункт и год разработки.

2. Раздел «Общая характеристика опасного объекта» включает в себя общие сведения об объекте и эксплуатирующей его организации, основные направления деятельности объекта, сведения об опасных веществах, характеристику природных условий района расположения объекта и т. д.

3. Раздел «Показатели степени риска чрезвычайных ситуаций» содержит:

- данные о показателях приемлемого риска для персонала объекта и населения, проживающего на близлежащей территории;
- данные о наиболее опасном и наиболее вероятном сценарии развития ЧС;
- показатели степени риска ЧС (индивидуальный, коллективный) и т. д.

4. Раздел «Характеристика аварийности и травматизма» отражает количество аварий и случаев травматизма на опасном объекте, их причины и последствия, выполнение мероприятий, предусмотренных актами расследования.

5. Раздел «Характеристика организационно-технических мероприятий, обеспечивающих безопасность объекта и готовность к ликвидации чрезвычайных ситуаций» отражает состояние работы:

- по анализу и предупреждению аварийности и травматизма на опасном объекте;
- выполнению мероприятий по предупреждению ЧС, в том числе мероприятий по предотвращению постороннего вмешательства в деятельность объекта и террористических актов;

- выполнению требований нормативных документов в области предупреждения и локализации ЧС;
- защите персонала объекта и его жизнеобеспечению в условиях ЧС;
- подготовке объекта и системы жизнеобеспечения к работе в условиях ЧС;
- подготовке системы управления, сил и средств объекта к ликвидации ЧС;
- заключению договора на страхование опасных объектов и т. д.

К ПБОО в обязательном порядке прилагаются *ситуационный план* с нанесенными на него зонами последствий от возможных ЧС на объекте, *диаграммы социального риска* (F/N-диаграмма и F/G-диаграмма), а также *расчетно-пояснительная записка*.

В расчетно-пояснительной записке приводятся расчеты по показателям степени риска опасного объекта. В нее включаются материалы, обосновывающие и подтверждающие показатели степени риска чрезвычайных ситуаций для персонала и проживающего вблизи населения, представленные в паспорте безопасности опасного объекта, а также расчеты по всем возможным сценариям развития чрезвычайных ситуаций.

При этом разработка расчетно-пояснительной записки не нужна, если на объекте утверждена декларация промышленной безопасности. Расчетно-пояснительная записка должна иметь следующую структуру:

- титульный лист;
- список исполнителей с указанием должностей, научных званий, название организации;
- аннотация;
- содержание (оглавление);
- задачи и цели оценки рисков;
- описание опасного объекта и краткая характеристика его деятельности;
- методология оценки риска, исходные данные и ограничения для определения показателей степени риска чрезвычайных ситуаций;
- описание применяемых методов оценки риска и обоснование их применения;

- результаты оценки риска ЧС, включая чрезвычайные ситуации, источниками которых могут явиться аварии или чрезвычайные ситуации на рядом расположенных объектах, транспортных коммуникациях, опасные природные явления;
- анализ результатов оценки риска;
- выводы с показателями степени риска для наиболее опасного и наиболее вероятного сценария чрезвычайных ситуаций;
- рекомендации для разработки мероприятий по снижению риска на опасном объекте.

При заполнении форм ПБОО разработчикам разрешается включать дополнительную информацию с учетом особенностей объекта.

Паспорт безопасности опасного объекта составляется по состоянию на начало января текущего года и дополняется или корректируется по мере необходимости с внесением изменений во все экземпляры. Как следствие, после обновления паспорт нужно заново утверждать и согласовывать с Главным управлением МЧС России по месту расположения объекта.

Контрольные вопросы

1. Чем вызвана необходимость разработки паспорта безопасности?
2. Когда и каким документом введена паспортизация безопасности критически важных и потенциально опасных объектов?
3. Назовите цели разработки паспорта безопасности.
4. На каких объектах необходимо разрабатывать паспорт безопасности?
5. Что должна содержать декларация промышленной безопасности?
6. Какие опасные объекты относятся к потенциально опасным объектам?
7. Какие опасные объекты относятся к особо опасным и технически сложным объектам?
8. Назовите основные разделы содержания типового паспорта безопасности.
9. Что означают диаграммы социального риска (F/N-диаграмма и F/G-диаграмма)?
10. Какие данные содержит раздел «Показатели степени риска чрезвычайной ситуации»?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование процессов поведения рабочего персонала, принятия решений руководящими лицами и структурами, технических вопросов в режимах чрезвычайных и аварийных ситуаций позволяет более полно и глубоко рассматривать прикладные вопросы теории эксплуатации систем теплоснабжения населённых мест и предприятий, в частности систем теплоснабжения и газоснабжения.

Представленные в учебно-практическом пособии сведения дают теоретический и практический материал, позволяющий получить законченное представление о выбранной теме. Издание позволяет обучающемуся получить необходимый набор знаний и сведений для использования их в реальной практике и при дальнейшем изучении специальности «Теплогазоснабжение».

Следует отметить, что существуют и более глубокие элементы изучения вопросов поведения в чрезвычайных и аварийных ситуациях, такие как теория катастроф, особенности турбулентного и ламинарного горения, высокоскоростное горение, взаимодействие факела с электромагнитным полем, использование нетрадиционного топлива, перспективы развития и др. Данные вопросы можно изучать в качестве дополнительного материала. Основные источники, по которым это можно сделать, приведены в библиографическом списке.

Пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по теплофизическому и теплотехническим направлениям. Однако оно может быть полезно также широкому кругу инженеров, аспирантов, технических специалистов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мaстрюков, Б. С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях в природно-техногенной сфере. Прогнозирование последствий : учеб. пособие для студентов вузов по направлению «Безопасность жизнедеятельности» / Б. С. Мaстрюков. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2012. – 368 с. – ISBN 978-5-7695-9523-3.

2. Чумаков, Н. А. Безопасность жизнедеятельности. Медицина катастроф : учеб. для студентов вузов по направлению подгот. «Техносферная безопасность» / Н. А. Чумаков. – М. : Академия, 2012. – 256 с. – ISBN 978-5-7695-5970-9.

3. Пожарная безопасность : учебник / под ред. Л. А. Михайлова. – М. : Академия, 2013. – 224 с. – ISBN 978-5-7695-6994-4.

4. Журавлева, Л. А. Пожарная техника : учеб. пособие / Л. А. Журавлева. – Саратов : СГАУ, 2012. – 135 с.

5. Журавлева, Л. А. История машин природообустройства и защиты в чрезвычайных ситуациях : учеб. пособие / Л. А. Журавлева, О. В. Карпова. – Саратов : СГАУ, 2019. – 128 с. – ISBN 978-5-00140-343-2.

6. Соловьев, Д. А. Приборы и робототехнические средства, используемые для ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и стихийных бедствий / Д. А. Соловьев, Л. А. Журавлева. – Саратов : СГАУ, 2011. – 17 с.

7. Аварийно-спасательный инструмент : метод. указания к лаб. работам / сост.: Д. А. Соловьев, Л. А. Журавлева. – Саратов : СГАУ, 2007. – 16 с.

8. Вовк, А. И. Анализ происшествий, аварий, чрезвычайных ситуаций и экологической обстановки в Саратовской области. По материалам правительства Саратовской области за 2003 – 2005 годы : учеб. пособие / А. И. Вовк. – Саратов : СГАУ, 2006. – 34 с.

9. Повзик, Я. С. Пожарная тактика / Я. С. Повзик П. П. Ключ, А. М. Матвейкин. – М. : Стройиздат, 1990. – 335 с. – ISBN 978-5-88800-325-1.

10. Закон «Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей» от 14 июля 1995 г. Постановление № 998-1 ГД. – URL: https://70.mchs.gov.ru/uploads/resource/2023-02-16/zakonodatelnye-akty-rf_16765144631242628994.pdf?ysclid=lssz74014e971768927 (дата обращения: 20.10.2023).

11. Постановления Правительства РФ от 18.11.1999 г. № 1266 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций», «О силах и средствах РСЧС». – URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/normativnye-pravovye-akty-mchs-rossii/664?ysclid=lssz872leb74551211412> (дата обращения: 20.10.2023).

12. Постановление Правительства РФ от 30.12.2003 г. № 794 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_45914/492eda9f08b2b56e284a2ab0b4c8d3719f3a2585/?ysclid=lssz97jihl213184959 (дата обращения: 20.10.2023).

13. Постановление Правительства РФ от 22.11.1997 г. № 1479 «Об аттестации аварийно-спасательных служб, аварийно-спасательных формирований и спасателей». – URL: <https://base.garant.ru/174320/?ysclid=lsszbx0wap768013022> (дата обращения: 20.10.2023).

14. Федеральный конституционный закон Российской Федерации от 30.05.2001г. 3-ФКЗ «О чрезвычайном положении». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_31866/?ysclid=lsszcre2ad29870465 (дата обращения: 20.10.2023).

15. Федеральный закон РФ от 21.12.1994 г. № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от ЧС природного и техногенного характера». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/?ysclid=lsszd4aewz335797461 (дата обращения: 20.10.2023).

16. Федеральный закон РФ от 22.08.1995 г. № 151-ФЗ «Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_7746/?ysclid=lsszdl3zlj669573253 (дата обращения: 20.10.2023).

17. Федеральный закон РФ от 12.02.1998 г. № 28-ФЗ «О гражданской обороне». – URL: <https://ogik.ru/upload/iblock/6ed/owz6g0cspxbwfe5dmzctjuwrci47stzd.pdf?ysclid=lsszeluqco36896557> (дата обращения: 20.10.2023).

18. Федеральный закон РФ от 21.12.1994 г. № 69-ФЗ «О пожарной безопасности». – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5438/?ysclid=lsszfgw1fi275857901 (дата обращения: 20.10.2023).

19. Приказ МЧС РФ от 23.12.2005 № 999 «Об утверждении Порядка создания нештатных аварийно-спасательных формирований». – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=442122&ysclid=lsszfvht2f707503029> (дата обращения: 20.10.2023).

20. Туркевич, М. А. Поисково-спасательные работы в горах / М. А. Туркевич. – М. : МЧС, 2000. – 329 с.

21. Кочеткова, К. Е. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий / К. Е. Кочеткова, В. А. Котляревский, А. В. Забегалов. – М. : Изд-во Ассоц. строит. вузов, 1996. – 408с. – ISBN 5-87829-030-8.

22. Дарман, П. Учебник выживания в экстремальных ситуациях / П. Дарман. – М. : Яуза, 2002. – 340 с. – ISBN 5-8153-0223-6.

23. Яковлев, А. Т. Медицина катастроф: основные понятия, термины и основы выживания / А. Т. Яковлев, Т. Г. Коваленко. учеб.-метод. пособие. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2001. – 104 с. – ISBN 5-85534-435-5.

24. Федорук, В. С. Организация и ведение аварийно-спасательных работ / В. С. Федорук, Л. В. Павлов. Ч. 3. Кн. 1. – Новогорск : АГЗ МЧС РФ, 2006. – 402 с. – ISBN 978-5-9229-0189-5.

25. Чурсин, В. Ф. Организация и ведение аварийно-спасательных работ / В.Ф. Чурсин. – Новогорск : АГЗ МЧС РФ, 2005. – 240 с. – ISBN 978-5-9229-0189-5.

26. Чумак, С. П. Аварийно-спасательные работы в условиях разрушенных зданий. Особенности технологии, организации и управления / С. П. Чумак. – М. : МЧС РФ, 2010. – 310 с. – ISBN 978-5-93970-042-9.

27. Одинцов, Л. Г., Парамонов, В. В. Технология и технические средства ведения ПСР и АСР / Л. Г. Одинцов. – М. : ЗНАК, 2004. – 230 с. – ISBN 5-93196-402-9.

28. Воробьев, Ю. Л. Учебник спасателя / Ю. Л. Воробьев. – М. : МЧС России, 1997. – 518 с.

29. Справочник спасателя / Л. Г. Одинцов [и др.]. – М. : ВНИИ ГОЧС, 2006. – 160 с.

30. Шойгу, С. К. Учебник спасателя / С. К. Шойгу, М. И. Фалеев, Т. Н. Кириллов. – Краснодар : Сов. Кубань, 2002. – 528 с. – ISBN 5-7221-0506-6.

31. Мазур, И. И. Конструктивная надежность и экологическая безопасность трубопроводов / И. И. Мазур, О. М. Иванцов, О. И. Молдаванов. – М. : Недра, 1990. – 263 с. – ISBN 5-247-00709-3.

32. Лисин, Ю. В. Концепция методического руководства по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах /

Ю. В. Лисин [и др.] // Трубопроводный транспорт нефти. – 1997. – № 12. – С. 8 – 14.

33. Воробьев, Ю. Л. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов / Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов. – М. : Ин-октаво, 2005. – 368 с. – ISBN 5-98738-033-2.

34. Фалеев, М. И. Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях / под общ. ред. М. И. Фалеева. – Калуга : Облиздат, 2001. – 98 с.

35. Стариков, А. Н. Основы теории горения и взрыва : учеб. пособие / А. Н. Стариков. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2018. – 152 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Атомная масса некоторых элементов

Название	Химический знак	Порядковый номер	Атомная масса
Азот	N	7	14,00
Водород	H	1	1,01
Кислород	O	8	16,00
Сера	S	16	32,06
Углерод	C	6	12,01

Таблица 2

Основные физические константы некоторых газов

Название или химическая формула	M , кг/кмоль	ρ , кг/м ³	$T_{пл}$, К	$T_{кип}$, К	ΔH_f^0 , кДж/моль
Воздух	28,98	1,293	60	81	0
СО	28,01	1,250	68	81	112,7
СО ₂	44,01	1,977	216,4	194,5	396,9
СН ₄	16,04	0,717	90,5	112,4	75
С ₂ Н ₆	30,06	1,357	90,5	184,4	88,4
С ₃ Н ₈	44,10	2,019	85,6	230,9	109,4
Н ₂	2,02	0,090	13,8	20,3	0
Н ₂ О (газ)	18,02	0,768	273	373,0	242,2
Н ₂	28,01	1,251	63	77,2	0
О ₂	32,00	1,429	54,6	90,1	0

Примечание. M – молекулярная масса газа; ρ – плотность при нормальных условиях; $T_{пл}$ и $T_{кип}$ – температура плавления и кипения при давлении 101,325 кПа; ΔH_f^0 – теплота образования.

Таблица 3

Теплота образования веществ, А, В, С в уравнении Антуана

$$\ln P = A \frac{B}{C+t}, \text{ где } P \text{ в кПа, а } t \text{ в } ^\circ\text{C}$$

№ п/п	Вещество	Теплота образования ΔH_f , кДж/моль	Темпера- тура ки- пения, °C	Коэффициенты уравнения Антуана		
				A	B	C
1	Амилбензол	34,4	202,0	6,68326	2069,486	210,431
2	Трет-амиловый спирт	330,0	102,3	6,44711	1252,216	180,301
3	Трет-бутилбензол	22,68	168,0	6,68934	1911,894	239,664
4	2,2-диметилбутан	177,8	49,7	5,93476	1127,187	228,9
5	2,4-диметилгексан	219,4	109,4	5,97799	1287,876	214,79
6	3,3-диметилгептан	241,6	137,0	6,21073	1509,585	221,989
7	2,6-диметил-4-гептанол	412,1	176,5	5,66299	1144,81	135,0
8	4,5-диметилоктан	253,4	79,2	5,93972	1190,033	223,303
9	2,4-диметил-3-пентанол	370,5	138,7	5,61923	1029,6	146,1
10	2,4-диметил-3-этилпентан	235,0	136,7	6,16233	1490,02	221,908
11	1,4-диэтилбензол	22,2	183,8	6,41434	1820,632	230,413
12	3,5-диэтилтолуол	56,0	201,0	6,50299	1926,654	229,367
13	Втор-изоамиловый спирт	314,2	112,0	6,9421	1090,9	157,2
14	Изобутиловый спирт	283,2	107,8	7,83005	2058,392	245,642
15	Изогексиловый спирт	325,7	151,6	7,05114	1273,35	153,56
16	4-изопропилгептан	251,1	158,0	6,31693	1628,498	219,75
17	П-ксилол	24,4	138,3	6,25485	1537,082	223,608
18	2-метил-1-бутанол	305,8	128,0	6,29693	1258,332	109,165
19	3-метилгексан	194,9	92,0	5,99812	1236,026	219,545
20	2-метилгептан	215,5	117,6	6,0423	1337,468	213,693
21	4-метилоктан	233,3	142,4	6,27293	1553,088	221,45
22	3-метилпентан	171,6	63,3	5,97380	1152,368	227,129
23	4-метил-2-пентанол	344,2	133,0	7,59199	2174,869	257,78
24	3-метил-4-этилгексан	229,9	140,6	6,21413	1524,093	221,543
25	2-метил-3-этилпентан	211,2	115,6	5,98851	1318,120	215,306

Окончание табл. 3

№ п/п	Вещество	Теплота образования ΔH_f , кДж/моль	Темпера- тура кипения, °С	Коэффициенты уравнения Антуана		
				<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
26	4-метил- 2-этилпентанол	385,0	177,3	5,70756	1134,599	129,195
27	Пентаметилбензол	73,5	232,0	6,68333	2069,486	210,431
28	Пропилбензон	7,9	159,0	6,29713	1627,827	220,199
29	1,2,3,4- тетраметилбензол	41,9	204,5	6,24188	1693,156	195,234
30	2,2,3,3- тетраметилгептан	276,3	184,0	6,28723	1715,171	216,609
31	2,3,3,4- тетраметилпентан	236,2	141,5	5,98454	1417,473	214,705
32	1,2,3- триметилбензол	9,46	176,1	6,44298	1791,164	227,844
33	2,2,3- триметилбутан	204,8	80,8	5,91723	1200,563	226,05
34	3,3,4- триметилгексан	235,9	140,4	6,15073	1499,426	221,333
35	2,5,5- триметилгептан	269,0	152,8	6,24873	1587,259	220,119
36	2,2,3- триметилпентан	220,0	109,8	5,95039	1294,875	218,42
37	Этилбензол	29,9	136,2	6,35879	1590,660	229,581
38	3-этилоктан	251,1	166,4	6,38063	1686,453	219,039
39	Метаэтилтолуол	1,8	161,3	6,35228	1676,538	224,676
40	3,3-диэтилпентан	231,9	146,0	6,01755	1451,245	215,575
41	Втор-октиловый спирт	380,5	178,5	6,02004	1335,88	151,798
42	Изобутан	134,5	11,7	5,95318	916,054	243,783
43	Изобутилбензол	21,5	172,8	6,72744	1977,892	246,029
44	Изогексан	174,3	60,3	5,96403	1135,41	226,572
45	Кумол (изопропилбензол)	21,5	152,4	6,06756	1461,643	207,56
46	Цимол (1-изопропил- 4-метилбензол)	28,8	177,0	6,64988	1893,381	232,655
47	М-ксилол (1,3- диметилбензол)	28,4	139,0	6,58807	1906,796	234,017
48	2-метилнонан	256,8	167,0	6,12003	1521,3	202,75
49	3-пентанол	316,0	116,0	6,57423	1354,42	183,41

Таблица 4

Энтальпия (теплосодержание) газов при постоянном давлении

Температура T , °С	H , кДж/моль					
	O ₂	N ₂	воздух	CO ₂	H ₂ O	SO ₂
100	3,0	2,9	2,9	3,8	3,3	4,1
200	6,0	5,8	5,8	8,0	6,8	8,5
300	9,1	8,8	8,9	12,5	10,4	13,2
400	12,4	11,8	11,9	17,3	14,0	18,2
500	15,7	14,9	15,1	22,3	17,8	23,3
600	19,1	18,1	18,3	27,5	21,7	28,5
700	22,5	21,3	21,5	32,8	25,8	33,9
800	26,0	24,6	24,8	38,2	29,9	39,3
900	29,6	28,0	28,2	43,8	34,2	44,8
1000	33,1	31,3	31,6	49,4	38,6	50,3
1100	36,8	34,8	35,1	55,1	43,2	55,9
1200	40,4	38,2	38,6	60,9	47,8	61,5
1300	44,0	41,7	42,1	66,8	52,6	67,2
1400	47,7	45,3	45,6	72,7	57,4	72,3
1500	51,5	48,8	49,2	78,6	62,3	78,4
1600	55,2	52,4	52,8	84,6	67,3	84,1
1700	59,0	55,9	56,4	90,5	72,4	89,8
1800	62,8	59,5	60,0	96,6	77,6	95,6
1900	66,6	63,1	63,6	102,6	82,8	101,2
2000	70,4	66,8	67,3	108,6	88,1	107,1
2100	74,2	70,4	71,0	114,7	93,4	112,7
2200	78,1	74,1	74,7	120,8	98,8	118,5
2300	82,0	77,8	78,4	126,9	104,2	124,2
2400	85,9	81,5	82,1	133,0	109,6	130,0
2500	89,9	85,1	85,9	139,1	115,1	135,8
2600	94,0	89,0	89,3	145,3	110,4	141,5
2700	97,9	92,6	93,1	151,5	124,8	147,3
2800	101,8	96,4	96,8	157,6	130,3	153,0
2900	105,1	100,5	100,5	163,8	135,8	158,8
3000	110,1	103,8	104,2	169,9	141,2	164,7

Таблица 5

Стехиометрические уравнения и тепловой эффект реакций горения сухих газов в кислороде

Наименование газов	Стехиометрическое уравнение горения	Теплота сгорания, МДж/м ³	
		Q_V	Q_H
Водород	$H_2 + 0,5O_2 \Rightarrow H_2O$	10,785	10,785
Оксид углерода	$CO + 0,5O_2 \Rightarrow CO_2$	12,627	12,627
Метан	$CH_4 + 2O_2 \Rightarrow CO_2 + 2H_2O$	39,758	35,831
Этан	$C_2H_6 + 3,5O_2 \Rightarrow 2CO_2 + 3H_2O$	69,668	63,765
Пропан	$C_3H_8 + 5O_2 \Rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	99,143	91,272
Бутан	$C_4H_{10} + 6,5O_2 \Rightarrow 4CO_2 + 5H_2O$	128,493	118,675
Пентан	$C_5H_{12} + 8O_2 \Rightarrow 5CO_2 + 6H_2O$	157,905	146,287
Этен	$C_2H_4 + 3O_2 \Rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	63,011	59,076
Пропен	$C_3H_6 + 4,5O_2 \Rightarrow 3CO_2 + 3H_2O$	91,942	86,039
Бутен	$C_4H_8 + 6O_2 \Rightarrow 4CO_2 + 4H_2O$	121,417	113,546
Пентен	$C_5H_{10} + 7,5O_2 \Rightarrow 5CO_2 + 5H_2O$	150,725	140,928
Ацетилен	$C_2H_2 + 2,5O_2 \Rightarrow 2CO_2 + H_2O$	58,008	56,044

Таблица 6

Температура самовоспламенения некоторых ароматических углеводородов в зависимости от средней длины углеродной цепи

l_{cp}	T_{cb}, K	l_{cp}	T_{cb}, K	l_{cp}	T_{cb}, K
-2	843	-	-	-	-
-1,9	842	0,1	810	2,1	702
-1,8	841	0,2	794	2,2	701
-1,7	840	0,3	774	2,3	701
-1,6	840	0,4	753	2,4	700
-1,5	839	0,5	733	2,5	700
-1,4	838	0,6	723	2,6	699
-1,3	837	0,7	718	2,7	699
-1,2	837	0,8	715	2,8	698
-1,1	836	0,9	713	2,9	698
-1,0	835	1,0	712	3,0	697
-0,9	835	1,1	711	3,1	697
-0,8	834	1,2	710	3,2	697
-0,7	833	1,3	709	3,3	697

Окончание табл. 6

l_{cp}	T_{cb}, K	l_{cp}	T_{cb}, K	l_{cp}	T_{cb}, K
-0,6	832	1,4	708	3,4	696
-0,5	831	1,5	707	3,5	696
-0,4	830	1,6	706	3,6	696
-0,3	829	1,7	705	3,7	696
-0,2	827	1,8	704	3,8	696
-0,1	824	1,9	703	3,9	696
0,0	819	2,0	703	4,0	695

Таблица 7

Температура самовоспламенения некоторых углеводородов
в зависимости от средней длины углеродной цепи

l_{cp}	T_{cb}, K						
3,0	743	6,0	507	9,0	482	12,0	477
3,1	738	6,1	505	9,1	481	12,1	477
3,2	733	6,2	504	9,2	481	12,2	477
3,3	728	6,3	503	9,3	481	12,3	477
3,4	723	6,4	502	9,3	480	12,4	477
3,5	717	6,5	501	9,4	480	12,5	477
3,6	712	6,6	500	9,5	480	12,6	477
3,7	706	6,7	499	9,7	480	12,7	477
3,8	699	6,8	498	9,8	479	12,8	477
3,9	693	6,9	497	9,9	479	12,9	477
4,0	686	7,0	496	10,0	479	13,0	477
4,1	680	7,1	495	10,1	479	13,1	477
4,2	673	7,2	494	10,2	479	13,2	477
4,3	665	7,3	494	10,3	479	13,3	477
4,4	654	7,4	493	10,4	478	13,4	477
4,5	643	7,5	492	10,5	478	13,5	477
4,6	631	7,6	491	10,6	478	13,6	476
4,7	617	7,7	490	10,7	478	13,7	476
4,8	601	7,8	489	10,8	478	13,8	476
4,9	581	7,9	489	10,9	478	13,9	476
5,0	560	8,0	488	11,0	478	14,0	476
5,1	547	8,1	487	11,1	478	14,1	476
5,2	535	8,2	486	11,2	478	14,2	476

Окончание табл. 7

$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{св}}, \text{K}$						
5,3	528	8,3	486	11,3	478	14,3	476
5,4	522	8,4	485	11,4	478	14,4	476
5,5	517	8,5	484	11,5	478	14,5	476
5,6	513	8,6	484	11,6	11,6	14,6	476
5,7	511	8,7	483	11,7	11,7	14,7	476
5,8	509	8,8	483	11,8	11,8	14,8	476
5,9	508	8,9	482	11,9	11,9	14,9	476
–	–	–	–	–	–	15,0	475

Таблица 8

Температура самовоспламенения некоторых предельных
одноатомных спиртов в зависимости
от средней длины углеродной цепи

$l_{\text{ср}}$	$T_{\text{св}}, \text{K}$						
2,0	737	4,4	610	6,8	545	9,2	518
2,1	736	4,5	606	6,9	543	9,3	517
2,2	734	4,6	602	7,0	542	9,4	516
2,3	732	4,7	599	7,1	540	9,5	516
2,4	730	4,8	595	7,2	539	9,6	515
2,5	728	4,9	592	7,3	537	9,7	514
2,6	725	5,0	588	7,4	536	9,8	513
2,7	721	5,1	585	7,5	535	9,9	513
2,8	716	5,2	582	7,6	534	10,0	512
2,9	711	5,3	579	7,7	533	10,5	509
3,0	706	5,4	577	7,8	531	11,0	507
3,1	696	5,5	574	7,9	530	11,5	506
3,2	693	5,6	572	8,0	529	12,0	505
3,3	636	5,7	569	8,1	528	12,5	505
3,4	678	5,8	567	8,2	527	13,0	504
3,5	669	5,9	564	8,3	526	13,5	504
3,6	658	6,0	562	8,4	525	14,0	503
3,7	649	6,1	560	8,5	524	14,5	503
3,8	642	6,2	557	8,6	523	15,0	502
3,9	634	6,3	555	8,7	522	15,5	502
4,0	628	6,4	553	8,8	521	16,0	501
4,1	623	6,5	551	8,9	520	16,5	501
4,2	619	6,6	549	9,0	519	17,0	500
4,3	614	6,7	547	9,1	519	17,5	500

Таблица 9

Показатели пожарной опасности некоторых горючих жидкостей

Название вещества	$T_{всп}, K$	$T_{пр}, K$	$T_{св}, K$	КПР об. %	$T_{Г}, K$	$Q_{н},$ кДж/моль	$E_{min},$ мДж	$V_{выг},$ см/ч	МВСК (при CO_2)
Ацетон	255	253-278	738	2,2-13	2160	1668	–	20	14,9
Бензол	262	259-286	807	1,4-7,1	2375	3141	0,22	30	14,4
Гексан	250	247-277	507	1,24-7,5	2238	3864	0,25	–	14,6
Глицерин 98 %	411	455-480	668	2,6-11,3	–	1483	–	–	–
Пентан	229	225-250	560	1,4-7,8	2007	–	0,22	–	14,8
Метанол	281	280-312	737	6,0-34,7	–	642	–	–	13,4
Этанол	286	284-314	677	3,6-19	–	1242	–	12–15	14,9
Протанол-1	296	–	644	2,1-13,5	–	1852	–	–	–
Бутанол-1	307	307-341	618	1,7-12,0	–	2456	–	–	–
Амиловый спирт	300-316	321-353	573	1,2-(10,0)	–	3077	–	–	–
Толуол	277	273-303	763	1,3-6,7	2344	3741	–	20	–
Диэтиловый эфир	232	228-286	437	1,7-49,0	–	2514	0,2	–	13
Уксусноэтиловый эфир	275	274-304	673	3,5-16,8	–	2075	–	–	–
Этиленгликоль	393	385-397	663	3,8-6,4	–	1064	–	–	–
Бензин А-76	239	239-269	573	0,79-5,16	2375	46928	–	–	–
Керосин тракторный	300	300-342	5335	1,4-7,5	–	41481- 46090	–	–	–
Трансформаторное масло	–	395-396	–	–	–	–	–	–	–
Вазелиновое масло	420	397-463	563	–	–	–	–	–	–
Масло подсолнечное	502	477-502	643	–	–	–	–	–	–
Нефть (Туймазинская)	252	252-298	593	–	–	–	–	–	–
Скипидар	307	305-326	573	0,8	–	–	–	–	–

Показатели пожарной опасности некоторых газов

Название вещества	T_{CB} , К	КПР, об. %	U_n , м/с	МВСК при разбавлении CO_2	E_{min} , мДж	Огнетушащая концентрация, об. %		T , К	Стехиометрическая концентрация горючего	Q_n , кДж/моль
						CO_2	N_2			
Аммиак	923	15-28	0,23	16,2	680	–	–	1777	21,9	317,2
Ацетилен	608	2-81	1,35	9	–	57	70	2307	7,7	1260
Окись углерода	883	12,5-74,2	0,42	9,8	–	53	69	2000	28,5	283,9
Водород	783	4-74,2	2,67	7,9	0,017	62	76	2072	29,5	242,2
Метан	810	5-15	0,37	15,6	0,26	26	39	1927	9,5	806
Этан	745	3,22-12,45	0,40	13,8	0,24	34	46	1922	5,64	1431
Пропан	739	2,37-9,5	0,38	14,3	0,25	32	45	1987	4,02	2049
Бутан	678	1,86-8,41	0,37	14,9	0,25	29	41	2010	3,12	2665
Этилен	813	3,75-29,6	0,63	12,1	0,12	42	52	2067	6,5	1326
Сероводород	519	4,3-45,5	–	8	–	62	–	–	12,24	–
Коксовый газ	913	5,6-30,8	–	–	–	–	–	–	–	–
Природный газ (Саратовский)	823 – 1023	5,1-12,1	–	–	–	–	–	–	–	–
Доменный газ	–	6,5-73,9	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. Состав газовых смесей:

- коксовый газ CO – 6,8 %, CO_2 – 2,8 %, N_2 – 7,8 %, H_2 – 5,8 %, CH_4 – 22,5 %;
- природный газ: CO – 3,3 %, CH_4 – 94 %, $C_n H_m$ – 2,5 %;
- доменный газ: CO – 28 %, CO_2 – 10,5 %, N_2 – 58,5 %, H_2 – 2,7 %, CH_4 – 0,3 %.

ОБЩЕПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АВР – аварийно-восстановительные работы
АВФ – аварийно-восстановительное формирование
АИУС – автоматизированная информационно-управляющая система
АСДНР – аварийно-спасательные и другие неотложные работы
АСИ – аварийно-спасательный инструмент
АСК – аварийно-спасательная команда
АСР – аварийно-спасательные работы
АСС – аварийно-спасательная служба
АСФ – аварийно-спасательное формирование
АХОВ – аварийно химически опасное вещество
АЭС – атомная электростанция
АЭУ – атомная энергетическая установка
БЛ – безопасность личности
БО – безопасность общества
ВБ – военная безопасность
ВВ – взрывчатое вещество
ВО – взрывопожароопасный объект
ВС – вооруженные силы
ВТО – высокоточное оружие
ГАСИ – гидравлический аварийно-спасательный инструмент
ГДОО – гидродинамический опасный объект
ГЗ – Гражданская защита
ГЗПУ – городской запасный пункт управления
ГСС – горно-спасательная служба
ГТОО – гидротехнический опасный объект
ГСГЗ – Государственная система Гражданской защиты
ДДС – дежурная диспетчерская служба
ДС – дежурная служба
ДТП – дорожно-транспортное происшествие
ЕДДС – единая дежурно-диспетчерская служба
ЖОН – жизнеобеспечение населения
ЗПУ – запасный пункт управления
ЗС – защитное сооружение
КГ – категорированный город
КГЗ – Комиссия по Гражданской защите

ЛБ – личная безопасность
ЛЧС – ликвидация чрезвычайной ситуации
ЛЭП – линия электропередач
МВД – Министерство внутренних дел
МЧС – Министерство чрезвычайных ситуаций
МВК ГЗ – Межведомственная комиссия по Гражданской защите
МВК – минимальная восстановительная концентрация
МФК – минимальная флегматизирующая концентрация
ОД – оперативный дежурный
ОХВ – опасные химические вещества
ОПО – объект потенциальной опасности
ПДК – предельно допустимая концентрация
ПЛЧС – предупреждение и ликвидация чрезвычайной ситуации
ПМП – первая медицинская помощь
ПОО – потенциально опасный объект
ППД – пункт постоянной дислокации
ППС – противопожарная служба
ППУ – подвижной пункт управления
ППЭ – промежуточный пункт эвакуации
ПРУ – противорадиационное укрытие
ПСО – поисково-спасательный отряд
ПСР – поисково-спасательные работы
ПСС – поисково-спасательная служба
ПСП – поисково-спасательное подразделение
ПСФ – поисково-спасательное формирование
ПУ – пункт управления
ПУД – пункт управления-дублер
ПУФ – повышение устойчивости функционирования (объектов экономики и территории)
ПХП – предприятия химической промышленности
ПЧС – предупреждение чрезвычайной ситуации
РВ – радиоактивное вещество
РОО – радиационно опасный объект
СДЯВ – сильнодействующее ядовитое вещество (устар.)
СЗЗ – санитарно-защитная зона
СИЗ – средство индивидуальной защиты
СНЛК – сеть наблюдения и лабораторного контроля

СОЧ – среда обитания человека
СЦ – спасательный центр
СЭП – сборно-эвакуационный пункт
ТехнолБ – технологическая безопасность
ТТХ – тактико-техническая характеристика
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль
УМЦ – учебно-методический центр
ФПГ – формирование повышенной готовности
ХЗ – химическое заражение
ХО – химическое оружие
ХОВ – химическое отравляющее вещество
ХОО – химически опасный объект
ЦКП – Центральный командный пункт
ЦУКС – Центр управления в кризисных ситуациях
ЧП – чрезвычайное происшествие
ЧС – чрезвычайная ситуация
ЭкБ – экологическая безопасность
ЭОр – экологическое оружие
ЭС – экологическая система

Учебное электронное издание

ФИЛИППОВ Владимир Васильевич
СТАРИКОВ Альберт Николаевич

ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
УСЛОВИЯХ И АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Учебно-практическое пособие

Редактор А. П. Володина
Технический редактор Ш. Ш. Амирсейидов
Компьютерная верстка Е. А. Кузьминой
Корректор Н. В. Пустовойтова
Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;
дисковод CD-ROM.

Тираж 9 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Институт архитектуры, строительства и энергетики
кафедра теплоснабжения, вентиляции и гидравлики
alstar@mail.ru