

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ФГБОУ ВО КЕМЕРОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
(УНИВЕРСИТЕТ)

Ю.И. Иванов, Т.А. Туманова, Д.А. Бесперстов

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ. ОЦЕНКА ПОЖАРНЫХ РИСКОВ
НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

Учебно-практическое пособие
для студентов специальности 20.05.01
«Пожарная безопасность» всех форм обучения

Кемерово 2017

УДК 614.841(075)

ББК 38.96я7

И20

Рецензенты:

А.И. Фомин, д-р техн. наук, профессор кафедры «Аэрология, охрана труда и природы» ФГБОУ ВО КузГТУ им. Т.Ф. Горбачева;

С.Ю. Сайбель, начальник факультета заочного обучения института заочного обучения, переподготовки и повышения квалификации ФГБОУ ВО Ивановский пожарно-спасательной академии ГП МЧС России, майор внутренней службы

*Рекомендовано редакционно-издательским советом
ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности (университет)»*

И 20 Иванов, Ю.И.

Пожарная безопасность технологических процессов. Оценка пожарных рисков на опасных производственных объектах: учебно-практ. пособие / Ю.И. Иванов, Т.А. Туманова, Д.А. Бесперстов; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет). – Кемерово, 2017. – 144 с.

ISBN 979-5-89289-104-1

В соответствии с Федеральными законами и нормативно-правовыми актами по пожарной и промышленной безопасности рассматриваются процедуры и аналитические методы, применяемые при проведении расчетов по оценке пожарного риска на производственных объектах. Приведены примеры расчетов величины пожарного риска для отдельных технологических процессов, а также задания по выполнению практических и контрольных работ. Сведения о показателях пожарной опасности веществ и материалов, необходимые для решения задач, приведены в соответствующих приложениях.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальности 20.05.01 «Пожарная безопасность», а также может быть полезно студентам, обучающимся по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность», профилю подготовки «Безопасность технологических процессов и производств».

УДК 614.841(075)

ББК 38.96я7

ISBN 979-5-89289-104-1

*Охраняется законом об авторском праве,
не может быть использовано любым
незаконным способом
без письменного договора*

© КемТИПП, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	10
2. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПО ОЦЕНКЕ ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ	13
2.1. Анализ пожарной опасности объекта	13
2.2. Определение частоты реализации пожароопасных ситуаций	15
2.3. Построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития	17
2.4. Оценка последствий воздействия ОФП на людей для различных сценариев его развития	20
2.5. Анализ наличия систем обеспечения пожарной безопасности зданий	21
3. ВЫЧИСЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА НА ОБЪЕКТЕ	23
3.1. Потенциальный риск в зданиях объекта	23
3.2. Потенциальный пожарный риск на территории объекта и в селитебной зоне вблизи объекта	27
3.3. Индивидуальный и социальный пожарный риск в селитебной зоне вблизи объекта	29
4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА	32
4.1. Истечение жидкости из резервуаров	32
4.2. Истечение сжатого газа	35
4.3. Истечение сжиженного газа из отверстия в резервуаре	36
4.4. Растекание жидкости при квазимгновенном разрушении резервуара	37
5. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МАССЫ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ, ПОСТУПАЮЩИХ В ОКРУЖАЮЩЕЕ ПРОСТРАНСТВО В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ	42
5.1. Общие положения	42
5.2. Разгерметизация надземного резервуара	43
5.3. Масса паров ЛВЖ, выходящих через дыхательную арматуру	44

5.4. Масса паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности в резервуаре	45
5.5. Оценка размеров взрывоопасных зон	46
6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СГОРАНИИ ГАЗО-, ПАРО-, ИЛИ ПЫЛЕ-ВОЗДУШНОГО ОБЛАКА	48
6.1. Классификация горючих веществ по степени чувствительности	49
6.2. Классификация окружающего пространства по степени загроможденности	52
6.3. Классификация режимов сгорания облака	52
6.4. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн давления	54
6.5. Расчет волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом	55
7. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА И ОГНЕННОГО ШАРА	57
7.1. Пожар пролива	57
7.2. Огненный шар	61
7.3. Методы оценки зон поражения при пожаре вспышке и факельном горении	62
8. ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПОРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ И ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛЮДЕЙ	65
8.1. Критерии поражения людей волной давления	65
8.2. Критерии поражения тепловым излучением	70
9. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ОТ НАЧАЛА ПОЖАРА ДО БЛОКИРОВАНИЯ ЭВАКУАЦИОННЫХ ПУТЕЙ ОПАСНЫМИ ФАКТОРАМИ ПОЖАРА И РАСЧЕТНОГО ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ	72
9.1. Метод определения времени от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара	72
9.2. Метод определения расчетного времени эвакуации	77
10. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ	83

11. ВЫБОР ЗАДАНИЯ И ВАРИАНТА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	105
12. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Перечень пожароопасных ситуаций и пожаров и сценариев их развития для одиночного РВС с купольной крышей без понтона.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Частоты разгерметизации для технологического оборудования производственных объектов.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Условная вероятность мгновенного воспламенения и воспламенения с задержкой	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Критические температуры, вызывающие потерю несущей способности строительных материалов.....	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Плотность углеводородов в жидком состоянии	136
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Номенклатура и основные параметры стальных резервуаров со стационарной крышкой	137
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Показатели пожарной опасности веществ.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Соотношения между различными единицами измерения давления.....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	140

ВВЕДЕНИЕ

Риск, в соответствии с современными взглядами, интерпретируется как частота возникновения техногенных или природных явлений, сопровождающихся возникновением, формированием и действием опасностей и нанесением при этом социального, экономического, экологического и других видов ущерба (вреда). Как правило, под ущербом в области пожарной безопасности подразумевается нанесение физического повреждения или другого вреда здоровью людей, или вреда имуществу или окружающей среде.

Понятие «риск» позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий. Риск фактически есть мера опасности. Часто используют понятие «степень риска» (Level of risk), по сути не отличающиеся от понятия риск, но лишь подчеркивающее, что речь идет об измеряемой или фиксированной величине.

Риск возникает при следующих необходимых и достаточных условиях:

- существование опасности (опасной ситуации);
- проявление опасности;
- подверженность объектов к воздействию опасности.

Риск является неизбежным, объективным сопутствующим фактором промышленной и иной деятельности. Результаты анализа риска имеют существенное значение для принятия обоснованных и рациональных решений при решении проблемы производственной безопасности.

Пожарный риск, согласно Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1], есть мера возможности реализации пожарной опасности объекта защиты и ее последствий для людей и материальных ценностей и является одним из ключевых понятий этого закона.

Согласно п. 7 статьи 6 ФЗ №123-ФЗ порядок проведения расчетов по оценке пожарного риска определяется нормативными правовыми актами Российской Федерации. В настоящее время порядок проведения расчетов по оценке пожарного риска

определяется постановлением Правительства РФ от 31 марта 2009 г. №272 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска» [2].

Согласно п. 5 указанных Правил определение расчетных величин пожарного риска проводится по методикам, утверждаемым МЧС России.

В соответствии с указанным постановлением Правительства Российской Федерации в 2009 г. в отношении производственных объектов была разработана и утверждена «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [3]. Данная методика утверждена приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404 и зарегистрированная в Минюсте РФ 17 августа 2009 №14541. В основу Методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах положена техническая концепция анализа риска, основанная на анализе частот возникновения ЧС (событий, инициирующих чрезвычайные ситуации) как способе определения их вероятностей, а основными элементами, входящими в систему анализа, являются источник опасности, опасное событие, вредные и поражающие факторы и объект воздействия.

Методы определения расчетных величин пожарного риска, изложенные в [3], ориентированы на выявление и оценку возможных потерь в случае производственных аварий при реализации различных сценариев их развития с использованием вероятностных и детерминированных критериев, методы оценки которых изложены также в [4, 5, 6, 13], что не противоречит требованиям ФЗ № 123 [1, ст. 4].

Целью оценки пожарного риска является определение уровня пожарной опасности промышленных предприятий (объектов). Оценка пожарного риска должна дать ответы на три основных вопроса:

- 1) что плохого может произойти? (Идентификация опасностей, анализ пожарной опасности);
- 2) как часто это может случиться? (Анализ частоты);
- 3) какие могут быть последствия? (Анализ последствий).

Количественной мерой возможности реализации пожарной опасности объекта является риск гибели людей в результате

воздействия на них опасных факторов пожара (ОФП), в том числе:

- риск гибели работника (персонала) объекта;
- риск гибели людей, находящихся на прилегающей к объекту территории.

Риск гибели людей в результате воздействия ОФП на объекте характеризуется числовыми значениями потенциального, индивидуального и социального пожарных рисков. Расчеты по оценке пожарного риска проводятся путем сопоставления расчетных величин пожарного риска с соответствующими нормативными значениями пожарных рисков, изложенных в ст. 93 ФЗ № 123 [1].

Результаты оценки пожарного риска используются:

- для обоснования обеспечения допустимых значений пожарного риска, установленных федеральным законодательством, в следующих случаях:

- а) объекты, для которых федеральными законами о технических регламентах и/или нормативными документами по пожарной безопасности не установлены требования пожарной безопасности;

- б) объекты, для которых не в полном объеме выполнены требования нормативных документов по пожарной безопасности;

- для принятия решений по разработке дополнительных мер по снижению пожарной опасности объекта в случае превышения одними или несколькими расчетными значениями пожарных рисков нормативных значений, установленных федеральным законодательством;

- при разработке проектной документации на объекты капитального строительства и проведении государственной экспертизы проектной документации.

Необходимость включения в проектную документацию расчетов по оценке пожарного риска регламентируется Постановлением Правительства Российской Федерации [7].

Целями учебно-практического пособия являются:

- закрепление теоретических знаний студентов по оценке пожарного риска технологических процессов промышленных производств на инженерном уровне;

- ранжирование (сравнение) количественных и качественных расчетных характеристик пожарного риска с соответствующими нормативными значениями пожарных рисков, установленных ФЗ № 123 [1, ст. 93] или дополнительными нормируемыми критериями, установленными [3, ст.5] и [4] для наружных установок;

- расстановка приоритетов и выработка решений, направленных на снижение пожарных рисков.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Определение расчетных величин пожарного риска на производственном объекте осуществляется согласно [1,3] и включает ряд последовательных процедур:

- изучение и составление описания объекта оценки пожарного риска;
- анализ пожарной опасности производственного объекта;
- определение частоты реализации первичных событий пожароопасных ситуаций на производственном объекте;
- построение логического дерева событий реализации опасных факторов пожара (ОФП);
- расчет частоты реализации ОФП в течение года j-го сценария развития пожара;
- расчет зон поражения опасными факторами пожара;
- расчет условной вероятности поражения человека в определенной точке территории в результате реализации j-го сценария развития аварии;
- вычисление фактического пожарного риска;
- оценка пожарного риска, т.е. сравнение фактического пожарного риска с нормативными значениями.

Статьей 93 ФЗ № 123 [1] установлены следующие нормативные значения пожарного риска для производственных объектов:

- величина индивидуального пожарного риска в зданиях, сооружениях и на территориях производственных объектов не должна превышать одну миллионную в год (т.е. 10^{-6} год⁻¹);
- для производственных объектов, на которых обеспечение величины индивидуального пожарного риска одной миллионной в год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается увеличение индивидуального пожарного риска до одной десятитысячной в год (т.е. 10^{-4} год⁻¹). При этом должны быть предусмотрены меры по обучению персонала действиям при пожаре и по социальной защите работников, компенсирующие их работу в условиях повышенного риска;

- величина индивидуального пожарного риска в результате воздействия ОФП на производственном объекте для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта, не должна превышать одну стомиллионную в год (т.е. 10^{-8} год⁻¹);

- величина социального пожарного риска воздействия ОФП на производственном объекте для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения вблизи объекта, не должна превышать одну десятиmillionную в год (т.е. 10^{-7} год⁻¹);

- для производственных объектов, на которых для людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой или зоне рекреационного назначения вблизи объекта, обеспечение величины индивидуального пожарного риска одной стомиллионной в год (т.е. 10^{-8} год⁻¹) и (или) величины социального пожарного риска одной десятиmillionной в год (т.е. 10^{-7} год⁻¹) невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается увеличение индивидуального пожарного риска до одной миллионной в год (т.е. 10^{-6} год⁻¹) и (или) социального пожарного риска до одной стотысячной в год (т.е. 10^{-5} год⁻¹) соответственно. При этом должны быть предусмотрены средства оповещения людей, находящихся в жилой зоне, общественно-деловой зоне или зоне рекреационного назначения, о пожаре на производственном объекте, а также дополнительные инженерно-технические и организационные мероприятия по обеспечению их пожарной безопасности и социальной защите.

К производственным объектам, для которых в связи со спецификой функционирования технологических процессов допускается увеличение индивидуального пожарного риска, рекомендуется относить:

- опасные производственные объекты в соответствии с ФЗ № 116 [18];

- производственные объекты, включающие здания (помещения) категорий А и/или Б, наружные установки категорий Ан и/или Бн;

- производственные объекты, на которых обращаются горючие вещества и материалы, нагретые выше температуры самовоспламенения.

В случае невозможности проведения оценки пожарного риска с использованием вероятностных критериев поражения людей ОФП допускается использование иных (детерминированных) критериев, количественные значения которых приведены в [4]:

- для категорий наружных установок Ан и Бн: горизонтальный размер зоны, ограничивающей газо-паровоздушные смеси с концентрацией горючего выше НКПР, превышает 30 м ($R_{\text{НКПР}} > 30$ м) и /или расчетное избыточное давление при сгорании газо-паро – или пылевоздушной смеси на расстоянии 30 м от наружной установки превышает 5 кПа, т.е. $\Delta P_{30} > 5$ кПа;

- для категории Вн: интенсивность теплового излучения от очага горения веществ и/или материалов, указанных для категории Вн, на расстоянии 30 м от наружной установки превышает 4 кВт/м², т.е. $q > 4$ кВт/м².

2. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПО ОЦЕНКЕ ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

2.1. Анализ пожарной опасности объекта

Анализ пожарной опасности производственного объекта, согласно ст. 94 [1], является одной из составляющих в оценке пожарного риска и предусматривает:

- анализ пожарной опасности технологической среды и параметров технологических процессов на производственном объекте;

- определение перечня пожароопасных аварийных ситуаций и параметров для каждого технологического процесса;

- определение для каждого технологического процесса перечня причин, возникновение которых позволяет характеризовать ситуацию как пожароопасную;

- построение сценариев возникновения и развития пожаров, влекущих за собой гибель людей.

Анализ пожарной опасности технологических процессов предусматривает сопоставление показателей пожарной опасности веществ и материалов, обращающихся в технологическом процессе, с параметрами технологического процесса. При анализе используются следующие сведения:

- данные о наличии и виде горючих веществ и материалов, их количестве, физико-химических свойствах и показателях пожарной опасности;

- технологические параметры оборудования (давление, температура, уровни заполнения, материальные потоки) и подводящих/отводящих трубопроводов (диаметр, толщина стенок, расстояние до отсекающей арматуры);

- параметры исполнительных механизмов систем противопожарной защиты (время закрытия и открытия запорной арматуры, надежность срабатывания, производительность насосов или других устройств аварийного опорожнения);

- геометрические характеристики взаимного расположения оборудования и его элементов, привязка единицы оборудования на местности.

Перечень показателей пожарной опасности веществ и материалов в зависимости от их агрегатного состояния, необходимых и достаточных для характеристики пожарной опасности технологической среды, регламентируется статьей 133 и таблицей 1 Федерального закона от 22.07.2008 г. №123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», а их количественные значения приведены в справочной [8,9] или технической литературе [10].

Определение перечня пожароопасных ситуаций на производственном объекте должно осуществляться на основе анализа пожарной опасности каждого из технологических процессов и предусматривать выбор ситуаций, при реализации которых возникает опасность для людей, находящихся в зоне поражения опасными факторами пожара, взрыва и сопутствующими проявлениями опасных факторов пожара.

Для периода нормального функционирования технологической системы характерны следующие события пожарной опасности:

- выход параметров процесса за критические значения;
- образование взрывоопасной среды в аппаратуре;
- взрыв в аппаратуре;
- разрушение аппаратуры;
- выброс пожароопасных веществ из аппаратуры;
- пожар на технологической системе.

Для каждой пожароопасной ситуации на производственном объекте должно быть приведено описание причин возникновения и развития пожароопасных ситуаций, места их возникновения и факторов пожара, представляющих опасность для жизни и здоровья людей в местах их пребывания.

Для определения причин возникновения пожароопасных ситуаций должны быть определены события, реализация которых может привести к образованию горючей среды и появлению источника зажигания. Наиболее вероятными событиями, которые могут являться причинами пожароопасных ситуаций на

производственных объектах, следует принимать следующие события:

- выход параметров технологических процессов за критические значения, который вызван нарушением технологического регламента (например, перелив жидкости при сливо-наливных операциях, разрушение оборудования вследствие превышения давления по технологическим причинам, появление источников зажигания в местах образования горючих газопаровоздушных смесей);

- разгерметизация технологического оборудования, вызванная механическим (влиянием повышенного или пониженного давления, динамических нагрузок и т. п.), температурным (влиянием повышенных или пониженных температур) и агрессивным химическим (влиянием кислородной, сероводородной, электрохимической и биохимической коррозии) воздействиями;

- механическое повреждение оборудования в результате ошибок персонала, падения предметов, некачественного проведения ремонтных и регламентных работ и т. п. (например, разгерметизация оборудования или выход из строя элементов его защиты в результате повреждения при ремонте или столкновения с железнодорожным или автомобильным транспортом).

Перечень потенциальных источников зажигания пожароопасной технологической среды определяется посредством сопоставления параметров технологического процесса и иных источников зажигания с показателями пожарной опасности веществ и материалов.

При анализе пожароопасных ситуаций, связанных с разгерметизацией технологического оборудования, следует рассмотреть утечки при различных диаметрах истечения (в том числе максимальные – при полном разрушении оборудования или подводящих/отводящих трубопроводов). Например, перечень пожароопасных ситуаций и пожаров, а также сценариев их развития для одиночного РВС с купольной крышей без понтона приведены в Приложении А.

2.2. Определение частоты реализации пожароопасных ситуаций

Частота реализации пожароопасных ситуаций является одним из ключевых параметров, используемых при расчете пожарного риска, уровня обеспечения пожарной безопасности людей, индивидуального и социального риска для производственных объектов [3].

Для определения частот реализации пожароопасных ситуаций на производственном объекте используется информация:

- об отказах оборудования, используемого на производственном объекте;
- о параметрах надежности используемого на производственном объекте оборудования;
- об ошибочных действиях персонала производственного объекта;
- о гидрометеорологической обстановке в районе размещения производственного объекта;
- о географических особенностях местности в районе размещения производственного объекта.

При определении частоты реализации пожароопасных ситуаций может учитываться иная информация, например, о воздействии соседних объектов, влиянии неблагоприятных природных явлений (землетрясения, проявления атмосферного электричества и т.д.).

Для определения частот реализации пожароопасных ситуаций могут использоваться статистические данные по аварийности или расчетные данные по надежности технологического оборудования, соответствующие специфике рассматриваемого производственного объекта.

Информация о частотах реализации пожароопасных ситуаций (в том числе возникших в результате ошибок персонала), необходимая для оценки риска, может быть получена непосредственно из данных о функционировании исследуемого объекта или из данных о функционировании других подобных объектов. Рекомендуемые сведения по частотам реализации иницирующих пожароопасные ситуации событий для некоторых типов

оборудования производственных объектов, частотам утечек из технологических трубопроводов, а также частотам возникновения пожаров в зданиях приведены в [3, 13, 14].

При использовании данных, приведенных в [3, 13, 14] для какого-либо резервуара, емкости, сосуда, аппарата, технологического трубопровода, необходимо учитывать частоты разгерметизации для всех размеров утечек, указанные для этой единицы технологического оборудования.

Частоты реализации пожароопасных ситуаций и возникновения пожаров могут быть получены с использованием анализа деревьев неисправностей в соответствии со стандартом [11] и руководящим документом [12]. Рекомендуемые сведения по частоте реализации событий инициирующих пожароопасные события приведены в Приложении Б.

2.3. Построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития

При построении полей опасных факторов пожара, взрыва для различных сценариев их развития следует учитывать [3] :

- тепловое излучение при факельном горении, пожарах проливов горючих веществ на поверхность и огненных шарах;
- избыточное давление и импульс волны давления при сгорании газопаровоздушной смеси в открытом пространстве;
- избыточное давление и импульс волны давления при разрыве сосуда (резервуара) в результате воздействия на него очага пожара;
- избыточное давление при сгорании газопаровоздушной смеси в производственном помещении;
- концентрацию токсичных компонентов продуктов горения в помещении;
- снижение концентрации кислорода в воздухе помещения;
- задымление атмосферы помещения;
- среднеобъемную температуру в помещении;
- расширяющиеся продукты сгорания при реализации пожара - вспышки.

Оценка величин указанных факторов проводится на основе анализа физических явлений, протекающих при пожароопасных ситуациях, пожарах, взрывах. Следует рассматривать при этом следующие процессы, возникающие при реализации пожароопасных ситуаций и пожаров или являющиеся их последствиями (в зависимости от типа оборудования и обращающихся на объекте горючих веществ):

- истечение жидкости из отверстия;
- истечение газа из отверстия;
- двухфазное истечение из отверстия;
- растекание жидкости при разрушении оборудования;
- выброс газа при разрушении оборудования;
- формирование зон загазованности;
- сгорание газопаровоздушной смеси в открытом пространстве;
- разрушение сосуда с перегретой легковоспламеняющейся жидкостью, горючей жидкостью или сжиженным горючим газом;
- тепловое излучение от пожара пролива или огненного шара;
- реализация пожара – вспышки;
- образование и разлет осколков при разрушении элементов технологического оборудования;
- испарение жидкости из пролива;
- образование газопаровоздушного облака (газы и пары тяжелее воздуха);
- сгорание газопаровоздушной смеси в технологическом оборудовании или помещении;
- пожар в помещении;
- факельное горение струи жидкости и/или газа;
- тепловое излучение горящего оборудования;
- вскипание и выброс горячей жидкости при пожаре в резервуаре.

Для определения возможных сценариев возникновения и развития пожаров рекомендуется использовать метод логических деревьев событий, представляющих собой графическое отображение общего характера развития аварийных ситуаций и аварий с отражением причинно-следственной взаимосвязи со-

бытий [3]. Дерево событий – формализованная последовательность потенциально возможных событий развития пожароопасной ситуации, исходящих из основного события, являющегося для дерева отказов головным (нежелательным) событием.

Сценарий возникновения и развития пожароопасной ситуации (пожара) на логическом дереве отражается в виде последовательности событий от исходного до конечного события (ветвь дерева событий).

Формат событий может быть вертикальным или горизонтальным. При вертикальном расположении завершающее событие должно находиться наверху страницы, а базисные события – внизу. При использовании горизонтального формата расположения, завершающее событие располагается на левой стороне страницы.

При построении логического дерева событий следует использовать:

- условную вероятность реализации различных ветвей логического дерева событий и перехода пожароопасной ситуации или пожара на ту или иную стадию развития;
- вероятность эффективного срабатывания соответствующих средств предотвращения или локализации пожароопасной ситуации или пожара (принимается по имеющимся статистическим данным или по паспортным данным оборудования);
- вероятность поражения расположенного в зоне пожара технологического оборудования и зданий производственного объекта в результате воздействия на них опасных факторов пожара, взрыва.

При определении условных вероятностей реализации различных сценариев должны приниматься во внимание свойства поступающих в окружающее пространство горючих веществ, условные вероятности реализации различных метеорологических условий (температура окружающей среды, скорость и направление ветра и т.д.), наличие и условные вероятности эффективного срабатывания систем противоаварийной и противопожарной защиты и т.д.

Рекомендуемые сведения по условной вероятности мгновенного воспламенения и воспламенения с задержкой, вероятности эффективного срабатывания некоторых систем противо-

пожарной защиты, а также примеры логических деревьев событий приведены в [3, 12, 13] и в Приложении В.

Условная вероятность, согласно общепринятому определению – это вероятность наступления одного события при условии, что другое событие уже произошло. Для ЛВЖ с температурой вспышки менее 28 °С следует использовать условные вероятности воспламенения как для двухфазной среды [3].

2.4. Оценка последствий воздействия ОФП на людей для различных сценариев его развития

Оценка опасных факторов пожара, взрыва для различных сценариев их развития осуществляется на основе сопоставления информации о моделировании динамики опасных факторов пожара на территории производственного объекта и прилегающей к нему территории и информации о критических для жизни и здоровья людей значениях опасных факторов пожара, взрыва. Для этого используются критерии поражения людей, зданий и оборудования опасными факторами пожара, взрыва.

Оценка последствий воздействия опасных факторов пожара, взрыва на людей для различных сценариев развития пожароопасных ситуаций предусматривает определение числа людей, попавших в зону поражения опасными факторами пожара, взрыва.

Для оценки пожарного риска следует использовать, как правило, вероятностные критерии поражения людей и окружающих зданий и оборудования опасными факторами. Детерминированные критерии используются при невозможности применения вероятностных критериев.

Вероятностные критерии показывают, какова условная вероятность поражения людей или разрушения зданий и оборудования при заданном значении опасного фактора пожара.

Детерминированные критерии показывают значения параметров опасного фактора, при которых наблюдается тот или иной уровень поражения людей или разрушения окружающих зданий и оборудования. В случае использования детерминированных критериев условная вероятность поражения принимает-

ся равной единице, если значение критерия превышает предельно допустимый уровень, и равной нулю, если значение критерия не превышает предельно допустимый уровень поражения людей или разрушения зданий, сооружений и оборудования.

Критерии поражения людей, зданий и оборудования опасными факторами аварий с пожарами и взрывами приведены в Приложении Г.

2.5. Анализ наличия систем обеспечения пожарной безопасности зданий

Каждый объект защиты должен иметь систему обеспечения пожарной безопасности.

Целью создания системы обеспечения пожарной безопасности объекта защиты является предотвращение пожара, обеспечение безопасности людей и защита имущества при пожаре.

Система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты включает в себя систему предотвращения пожара, систему противопожарной защиты, комплекс организационно-технических мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Система обеспечения пожарной безопасности объекта защиты в обязательном порядке должна содержать комплекс мероприятий, исключающих возможность превышения значений допустимого пожарного риска, установленного Федеральным законом № 123-ФЗ, и направленных на предотвращение опасности причинения вреда третьим лицам в результате пожара.

К мероприятиям по снижению последствий пожара следует относить [3, 5]:

- ограничение растекания горючих жидкостей по цеху, производственной площадке или складу;
- уменьшение интенсивности испарения горючих жидкостей;
- аварийный слив горючих жидкостей в аварийные емкости;
- установку огнепреградителей;

- ограничение массы опасных веществ при хранении их в технологических аппаратах;
- водяное орошение технологических аппаратов и резервуаров;
- флегматизацию горючих смесей в аппаратах и технологическом оборудовании;
- вынос пожароопасного оборудования в изолированные помещения;
- применение устройств, снижающих давление в аппаратах до безопасной величины при сгорании газо-, паро- и пылевоздушных смесей;
- установку в технологическом оборудовании быстродействующих отключающих устройств;
- ограничение распространения пожара, взрыва с помощью противопожарных разрывов и преград с требуемым пределом огнестойкости;
- применение огнезащитных красок и покрытий;
- защиту технологических процессов установками пожаротушения;
- применение пожарной сигнализации и системы оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре;
- обучения персонала предприятий способам ликвидации аварий;
- создание условий для скорейшего ввода в действие подразделений пожарной охраны путем устройства подъездных путей, пожарных водоемов и наружного противопожарного водопровода.

3. ВЫЧИСЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА НА ОБЪЕКТЕ

Расчет значений индивидуального и социального пожарных рисков для зданий (частей зданий - пожарных отсеков), сооружений, а также для территории производственных объектов и прилегающей к объекту территории следует проводить по изложенному в [3] порядку, используя в качестве промежуточной величины значения потенциального пожарного риска для территории и зданий объекта.

3.1. Потенциальный риск в зданиях объекта

Величина потенциального риска P_i (год⁻¹) в i -ом помещении здания определяется по формуле:

$$P_i = \sum_{j=1}^J Q_j Q_{dij}, \quad (3.1)$$

где J – число сценариев возникновения пожара в здании; Q_j – частота реализации в течение года j -го сценария пожара, год⁻¹; Q_{dij} – условная вероятность поражения человека при его нахождении в i -ом помещении при реализации j -го сценария пожара.

Условная вероятность поражения человека Q_{dij} определяется по формуле:

$$Q_{dij} = (1 - P_{Эij}) \cdot (1 - D_{ij}), \quad (3.2)$$

где $P_{Эij}$ – вероятность эвакуации людей, находящихся в i -ом помещении здания, при реализации j -го сценария пожара; D_{ij} – вероятность эффективной работы технических средств по обеспечению безопасности людей в i -ом помещении при реализации j -го сценария пожара.

Вероятность эвакуации $P_{Эij}$ рассчитывают по формуле:

$$P_{Эij} = 1 - (1 - P_{Э.Пij}) \cdot (1 - P_{Д.Вij}), \quad (3.3)$$

где $P_{\text{Э.П}ij}$ – вероятность эвакуации людей, находящихся в i -ом помещении здания, по эвакуационным путям при реализации j -го сценария пожара; $P_{\text{Д.В}ij}$ – вероятность покидания здания людьми, находящимися в i -ом помещении, через аварийные выходы или с помощью иных средств спасения.

При отсутствии данных вероятность $P_{\text{Д.В}ij}$ допускается принимать равной 0,03 при наличии аварийных выходов или средств спасения и 0,001 – при их отсутствии.

Вероятность эвакуации по эвакуационным путям $P_{\text{Э.П}ij}$ рассчитывают по формуле:

$$P_{\text{Э.П}ij} = \begin{cases} \frac{0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij} - t_{Pij}}{\tau_{\text{Н.Э}}}, & \text{если } t_{Pij} < 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij} < t_{Pij} + \tau_{\text{Н.Э}ij}; \\ 0,999, & \text{если } t_{Pij} + \tau_{\text{Н.Э}ij} \leq 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij}; \\ 0,001, & \text{если } t_{Pij} \geq 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij}, \end{cases} \quad (3.4)$$

где $\tau_{\text{бл}ij}$ – время от начала реализации j -го сценария пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара, имеющих предельно допустимые для людей значения (время блокирования эвакуационных путей), мин; t_{Pij} – расчетное время эвакуации людей из i -го помещения при j -ом сценарии пожара, мин; $\tau_{\text{Н.Э}ij}$ – интервал времени от начала реализации j -го сценария пожара до начала эвакуации людей из i -го помещения, мин.

Время от начала пожара до начала эвакуации людей $\tau_{\text{Н.Э}}$ для зданий (сооружений) без систем оповещения рассчитывают по результатам исследования поведения людей при пожарах в зданиях конкретного назначения.

При наличии в здании системы оповещения о пожаре $\tau_{\text{Н.Э}}$ принимают равным времени срабатывания системы с учетом ее инерционности. При отсутствии необходимых исходных данных для определения времени начала эвакуации в зданиях (сооружениях) без систем оповещения $\tau_{\text{Н.Э}}$ допускается принимать рав-

ным 0,5 мин – для этажа пожара и 2 мин – для вышележащих этажей.

Если местом возникновения пожара является зальное помещения, где пожар может быть обнаружен одновременно всеми находящимися в нем людьми, то $\tau_{н.э}$ допускается принимать равным нулю.

В этом случае вероятность $P_{э.Пij}$ вычисляется по формуле:

$$P_{э.Пij} = \begin{cases} 0,999, & \text{если } t_{Pij} < 0,8 \cdot \tau_{бlij}; \\ 0,001, & \text{если } t_{Pij} \geq 0,8 \cdot \tau_{бlij}. \end{cases} \quad (3.5)$$

Расчетное время эвакуации t_{Pij} рассчитывается при максимально возможной расчетной численности людей в здании, определяемой на основе решений по организации эксплуатации здания, от наиболее удаленной от эвакуационных выходов точки i -го помещения. Допускается определение расчетного времени эвакуации на основе экспериментальных данных.

Время от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара и расчетное время эвакуации определяется по методам, приведенным в [3, прил.5].

При определении величин потенциального риска для работников, которые находятся в здании на территории производственного объекта, допускается для здания рассматривать в качестве расчетного один наиболее неблагоприятный сценарий возникновения пожара, характеризующийся максимальной условной вероятностью поражения человека. В этом случае расчетная частота возникновения пожара принимается равной суммарной частоте реализации всех возможных в здании сценариев возникновения пожара.

Вероятность D_{ij} эффективной работы технических средств по обеспечению пожарной безопасности i -го помещения при реализации j -го сценария пожара рассчитывают по формуле:

$$D_{ij} = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - D_{ijk}), \quad (3.6)$$

где K – число технических средств противопожарной защиты; D_{ijk} – вероятность эффективного срабатывания (выполнения задачи) k -го технического средства при j -ом сценарии пожара для i -го помещения здания.

При отсутствии данных по эффективности технических средств величины D_{ij} допускается принимать равными нулю.

При определении значений D_{ij} следует учитывать только технические средства, направленные на обеспечение пожарной безопасности находящихся (эвакуирующихся) в i -ом помещении здания людей при реализации j -го сценария пожара. При этом следует учитывать следующие мероприятия:

- применение объемно-планировочных и конструктивных решений, обеспечивающих ограничение распространения пожара в безопасную зону (при организации эвакуации в безопасную зону);

- наличие систем противодымной защиты рассматриваемого помещения и путей эвакуации;

- использование автоматических установок пожарной сигнализации (АУПС) в сочетании с системой оповещения и управления эвакуацией (СОУЭ) людей при пожарах;

- наличие стационарных установок пожаротушения в помещении очага пожара.

При определении условной вероятности поражения людей, находящихся в помещении очага пожара, не допускается учитывать наличие в этом помещении АУПС и СОУЭ (за исключением случаев, когда пожар не может быть обнаружен одновременно всеми находящимися в помещении людьми), а также установок пожаротушения, срабатывание которых допускается только после эвакуации находящихся в защищаемом помещении людей (например, при наличии установок порошкового, газового и аэрозольного пожаротушения, а также комбинированных установок, использующих указанные огнетушащие вещества).

3.2. Потенциальный пожарный риск на территории объекта и в селитебной зоне вблизи объекта

Величина потенциального пожарного риска $P(a)$ (год⁻¹) (далее – потенциальный риск) в определенной точке (a) как на территории производственного объекта, так и на прилегающей к объекту территории определяется с помощью соотношения:

$$P(a) = \sum_{j=1}^J Q_{dj}(a) Q_j, \quad (3.7)$$

где J – число сценариев развития пожароопасных ситуаций (пожаров, ветвей логического дерева событий); $Q_{dj}(a)$ – условная вероятность поражения человека в определенной точке территории (a) в результате реализации j -го сценария развития пожароопасных ситуаций, отвечающего определенному инициирующему аварии событию; Q_j – частота реализации в течение года j -го сценария развития пожароопасных ситуаций, год⁻¹.

Условные вероятности поражения человека $Q_{dj}(a)$ определяются по значениям пробит-функций.

Величина $P(a)$ определяется посредством наложения зон поражения опасными факторами с учетом частоты реализации каждого сценария развития пожароопасных ситуаций на генеральный или ситуационные планы производственного объекта с привязкой их к соответствующему инициирующему аварии событию (элементу оборудования, технологической установке) и ориентированию зоны поражения в соответствии с метеорологическими условиями (для пожара пролива, струйного горения, пожара-вспышки, образования и сгорания газопаровоздушного облака). При расчете риска рассматриваются различные метеорологические условия с типичными направлениями ветров и ожидаемой частотой их возникновения.

Процедура расчета риска предусматривает рассмотрение различных пожароопасных ситуаций, определение зон поражения опасными факторами пожара, взрыва и частот реализации указанных пожароопасных ситуаций. Для удобства расчетов

территорию местности разделяют на зоны, внутри которых величины $P(a)$ полагаются одинаковыми.

В необходимых случаях оценка условной вероятности поражения человека проводится с учетом совместного воздействия более чем одного опасного фактора (для ветвей со стадиями с условием перехода «И»). Так, например, для расчета условной вероятности поражения человека при реализации сценария, связанного со взрывом резервуара с ЛВЖ под давлением, находящегося в очаге пожара, необходимо учитывать, кроме теплового излучения огненного шара, воздействие волны сжатия.

Условная вероятность поражения человека $Q_{dj}(a)$ от совместного независимого воздействия несколькими опасными факторами в результате реализации j -го сценария развития пожароопасных ситуаций определяется следующим образом:

$$Q_{dj}(a) = 1 - \prod_{k=1}^h (1 - Q_k Q_{djk}(a)), \quad (3.8)$$

где h – число рассматриваемых опасных факторов; Q_k – вероятность реализации k -го опасного фактора; $Q_{djk}(a)$ – условная вероятность поражения k -ым опасным фактором.

Результаты расчетов потенциального риска отображаются на карте (ситуационном и генеральном плане) производственного объекта и прилегающих районов в виде замкнутых линий равных значений (изолинии функции $P(a)$).

Изолинии функции $P(a)$ являются контурами риска, они разделяют территорию объекта (так же, как и местность вокруг объекта) на области, в которых ожидаемая частота возникновения опасных факторов, приводящих к гибели людей, заключена в определенных пределах.

Контуры риска не зависят от количества персонала объекта или должностных обязанностей работников, а определяются исключительно используемой технологией производства и надежностью применяемого оборудования.

3.3. Индивидуальный и социальный пожарный риск в селитебной зоне вблизи объекта

Для людей, находящихся в селитебной зоне вблизи производственного объекта, индивидуальный пожарный риск (далее – индивидуальный риск) принимается равным величинам потенциального риска в этой зоне, рассчитанным по формуле (3.7).

Индивидуальный риск для работников объекта оценивается частотой поражения определенного работника производственного объекта опасными факторами пожара, взрыва в течение года.

Области, на которые разбита территория производственного объекта, нумеруются:

$$i = 1, \dots, I.$$

Работники производственного объекта нумеруются:

$$m = 1, \dots, M.$$

Номер работника m , однозначно определяет наименование должности работника, его категорию и другие особенности его профессиональной деятельности, необходимой для оценки пожарной безопасности. Допускается проводить расчет индивидуального риска для персонала производственного объекта, относя его к одной категории наиболее опасной профессии.

Величина индивидуального риска R_m (год⁻¹) для работника m производственного объекта при его нахождении на территории объекта определяется с помощью соотношения:

$$R_m = \sum_{i=1}^I q_{im} \cdot P(i), \quad (3.9)$$

где $P(i)$ – величина потенциального риска в i -ой области территории объекта, год⁻¹; q_{im} – вероятность присутствия работника m в i -ой области территории объекта.

Величина индивидуального риска R_m (год⁻¹) для работника m при его нахождении в здании производственного объекта, обусловленная опасностью пожаров в здании, определяется по выражению:

$$R_m = \sum_{i=1}^N P_i \cdot q_{im}, \quad (3.10)$$

где P_i – величина потенциального риска в i -ом помещении здания, год⁻¹; q_{im} – вероятность присутствия работника m в i -ом помещении; N – число помещений в здании.

Индивидуальный риск работника m производственного объекта определяется как сумма величин индивидуального риска при нахождении работника на территории и в зданиях производственного объекта, рассчитанных по формулам (3.9) и (3.10).

Вероятность q_{im} определяется, исходя из доли времени нахождения рассматриваемого человека в определенной области территории и/или в i -ом помещении здания в течение года на основе решений по организации эксплуатации и технического обслуживания оборудования и здания производственного объекта.

Для производственных объектов социальный пожарный риск (далее – социальный риск) принимается равным частоте возникновения событий, при реализации которых может пострадать в результате воздействия опасных факторов пожара, взрыва не менее 10 человек.

Для людей, находящихся в селитебной зоне вблизи объекта, индивидуальный пожарный риск принимается равным величинам потенциального риска в этой зоне с учетом доли времени присутствия людей в зданиях и сооружениях вблизи производственного объекта:

- для зданий и сооружений классов Ф1 по функциональной пожарной опасности – 1;

- для зданий и сооружений классов Ф2 - Ф5 по функциональной пожарной опасности с круглосуточным режимом работы – 1, при некруглосуточном режиме работы доля времени присутствия людей определяется в соответствии с организационно-распорядительными документами для этих зданий и сооружений.

Для людей, находящихся в селитебной зоне вблизи производственного объекта, социальный риск S (год⁻¹) определяется по формуле:

$$S = \sum_{j=1}^L Q_j, \quad (3.11)$$

где L – число сценариев развития пожароопасных ситуаций (пожаров), для которых выполняется условие $N_i \geq 10$; N_i – среднее число погибших людей в селитебной зоне вблизи производственного объекта в результате реализации j -го сценария в результате воздействия опасных факторов пожара, взрыва.

Величина N_i определяется по формуле:

$$N_i = \sum_{i=1}^I Q_{dij} \cdot n_i, \quad (3.12)$$

где I – количество областей, на которые разделена территория, прилегающая к производственному объекту (i – номер области); Q_{dij} – условная вероятность поражения человека, находящегося в i -ой области, опасными факторами при реализации j -го сценария; n_i – среднее число людей, находящихся в i -ой области.

4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ ПОЖАРА

Для оценки опасных факторов, реализующихся при пожарах в зданиях (помещениях) производственных объектов следует использовать методы, регламентированные Приложением 5 приказа МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» [3].

Допускается использовать методы, содержащиеся в методиках определения расчетных величин пожарного риска, утвержденных Министерством Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [4], а также в нормативных правовых актах и нормативных документах федеральных органов исполнительной власти [5,6], содержащие требования пожарной безопасности в части, не противоречащей требованиям ФЗ № 123 [1].

В случае невозможности проведения оценки пожарного риска (например, из-за отсутствия необходимых данных) допускается использование иных (детерминированных) критериев пожарной безопасности технологических процессов.

Значения допустимых параметров пожарной опасности должны быть такими, чтобы исключить гибель людей и ограничить распространение аварии за пределы рассматриваемого технологического процесса на другие объекты, включая опасные производства.

4.1. Истечение жидкости из резервуаров

Метод устанавливает параметры истечения горючей жидкости из отверстий резервуара при его разгерметизации и количество жидкости, перелившейся через обвалование.

Цель расчетов – определение количества жидкости, вылившейся через отверстие резервуара при его разгерметизации и перелившейся через обвалование.

Рассматривается резервуар, находящийся в обваловании (рис. 4.1).

Вводятся следующие допущения:

- истечение через отверстие однофазное;
- резервуар имеет постоянную площадь сечения по высоте;
- диаметр резервуара много больше размеров отверстия;
- размеры отверстия много больше толщины стенки;
- поверхность жидкости внутри резервуара горизонтальна;
- температура жидкости остается постоянной в течение времени истечения.

Массовый расход жидкости G (кг/с) через отверстие во времени t (с) определяется по формуле:

$$G(t) = G_0 - \frac{\rho \cdot g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2}{A_R} \cdot t, \quad (4.1)$$

где G_0 – массвый расход в начальный момент времени, кг/с, определяемый по формуле:

$$G_0 = \mu \cdot \rho \cdot A_{hol} \cdot \sqrt{2g \cdot (h_0 - h_{hol})}, \quad (4.2)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²); μ – коэффициент истечения; A_{hol} – площадь отверстия, м²; h_{hol} – высота расположения отверстия, м; A_R – площадь сечения резервуара, м²; h_0 – начальная высота столба жидкости в резервуаре, м.

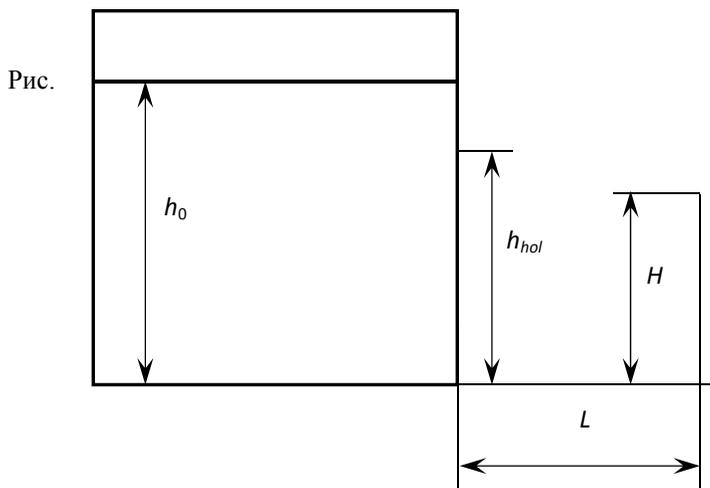
Зависимость высоты столба жидкости в резервуаре h (м) от времени t определяется по формуле:

$$h(t) = h_0 - \frac{G_0}{\rho \cdot A_R} \cdot t + \frac{g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2 \cdot t^2}{2 \cdot A_R^2}. \quad (4.3)$$

Условие перелива струи жидкости (при $h_0 > h_{hol}$) через обвалование может быть приближенно записано следующим образом:

$$h_{hol} \geq H + \frac{L}{\mu}, \quad (4.4)$$

где H – высота обвалования, м; L – расстояние от стенки резервуара до обвалования, м.



4.1. Схема для расчета истечения жидкости из отверстия в резервуаре

Количество жидкости m (кг), перелившейся через обвалование за полное время истечения, определяется по формуле:

$$m = \int_0^{t_{pour}} G(t) dt = G_0 \cdot t_{pour} - \frac{\rho \cdot g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2}{2A_R} \cdot t_{pour}^2, \quad (4.5)$$

где t_{pour} – время, в течение которого жидкость переливается через обвалование, с, (т.е. время, в течение которого выполняется условие (4.4)).

Величина t_{pour} определяется по формуле:

$$t_{pour} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (4.6)$$

где a, b, c – параметры, определяемые по формулам:

$$a = g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2 / (2A_R^2), \text{ м/с}^2; \quad (4.7)$$

$$b = -\frac{G_0}{\rho \cdot A_R}, \text{ м/с}; \quad (4.8)$$

$$c = h_0 - H - \frac{L}{\mu}, \text{ м}. \quad (4.9)$$

В случае, если жидкость в резервуаре находится под избыточным давлением ΔP (Па), величина мгновенного массового расхода G_0 (кг/с) определяется по формуле:

$$G_0 = \mu \cdot \rho \cdot A_{hol} \sqrt{2\Delta P / \rho + 2g(h_0 - h_{hol})}. \quad (4.10)$$

Для определения количества жидкости, перелившейся через обвалование, и времени перелива следует проинтегрировать соответствующую систему уравнений, где величина ΔP может быть переменной.

4.2. Истечение сжатого газа

Массовая скорость истечения сжатого газа из резервуара определяется по формулам [3]:

докритическое истечение:

$$\text{при } \frac{P_a}{P_V} \geq \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad (4.11)$$

$$G = A_{hol} \mu \left[P_V \rho_V \cdot \left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \right) \cdot \left(\frac{P_a}{P_V} \right)^{2/\gamma} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{P_a}{P_V} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \right\} \right]^{1/2}, \quad (4.12)$$

сверхкритическое истечение:

$$\text{при } \frac{P_a}{P_V} < \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}, \quad (4.13)$$

$$G = A_{hol} \mu \left[P_V \rho_V \cdot \gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} \right]^{1/2}, \quad (4.14)$$

где G – массовый расход, кг/с; P_a – атмосферное давление, Па; P_V – давление газа в резервуаре, Па; γ – показатель адиабаты газа; A_{hol} – площадь отверстия, м²; μ – коэффициент истечения (при отсутствии данных допускается принимать равным 0,8); ρ_V – плотность газа в резервуаре при давлении P_V , кг/м³.

4.3. Истечение сжиженного газа из отверстия в резервуаре

Массовая скорость истечения паровой фазы G_V (кг/с) определяется по формуле [3]:

$$G_V = \mu \cdot A_{hol} \sqrt{\left(\frac{P_C M}{RT_C} \right)} \cdot P_C \cdot (0,167 P_R^5 + 0,534 P_R^{1,95}), \quad (4.15)$$

где μ – коэффициент истечения; A_{hol} – площадь отверстия, м²; P_C – критическое давление сжиженного газа, Па; M – молярная

масса, кг/моль; R – универсальная газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(К·моль); T_C – критическая температура сжиженного газа, К; $P_R = P_V/P_C$ – безразмерное давление сжиженного газа в резервуаре; P_V – давление сжиженного газа в резервуаре, Па.

Массовую скорость истечения паровой фазы можно также рассчитывать по формулам (4.11) – (4.14).

Массовая скорость истечения жидкой фазы G_L (кг/с) определяется по формуле:

$$G_L = G_V \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{\rho_L}{\rho_V}\right) P_R}}{\left(1,22 \cdot T_R^{3/2}\right)}, \quad (4.16)$$

где ρ_L – плотность жидкой фазы, кг/м³; ρ_V – плотность паровой фазы, кг/м³; $T_R = T/T_C$ – безразмерная температура сжиженного газа; T – температура сжиженного газа в резервуаре, К.

Формулы (4.15) и (4.16) рекомендуется использовать при $0,1 \leq P_R \leq 0,9$. При иных значениях P_R для расчета величины массовой скорости истечения сжиженного газа рекомендуется использование формулы (4.10) [13].

4.4. Растекание жидкости при квазимгновенном разрушении резервуара

Под квазимгновенном разрушением резервуара следует понимать внезапный (в течении секунд или долей секунд) распад резервуара на приблизительно равные по размеру части. При такой пожароопасной ситуации часть хранимой в резервуаре жидкости может перелиться через обвалование.

Ниже представлена математическая модель, позволяющая оценить долю жидкости, перелившейся через обвалование при квазимгновенном разрушении резервуара. Приняты следующие допущения:

- рассматривается плоская одномерная задача;

- время разрушения резервуара много меньше характерного времени движения гидродинамической волны до обвалования;

- жидкость является невязкой;
- трение жидкости о поверхность земли отсутствует;
- поверхность земли является плоской, горизонтальной.

Система уравнений, описывающих движение жидкости, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot [(h - h_G) \cdot u] = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\frac{u^2}{2} + gh \right) = 0 \end{cases}, \quad (4.17)$$

где h – высота столба жидкости над фиксированным уровнем, м; h_G – высота подстилающей поверхности над фиксированным уровнем, м; u – средняя по высоте скорость движения столба жидкости, м/с; x – координата вдоль направления движения жидкости, м; t – время, с; g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$).

График расчетной и экспериментальной зависимостей массовой доли перелившейся через обвалование жидкости Q от параметра a/h_0 представлен на рис.4.3.

Граничные условия с учетом геометрии задачи (рис.4.2) имеют вид:

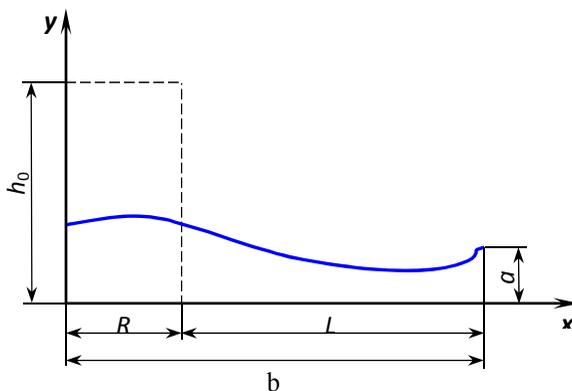
$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad (4.18)$$

$$u|_{x=0} = 0; \quad (4.19)$$

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=b} = 0; \quad (4.20)$$

$$u|_{x=b} = \begin{cases} g^{1/2}(h-a)^{3/2}/h, & \text{если } h > a; \\ 0, & \text{если } h \leq a. \end{cases} \quad (4.21)$$

где a – высота обвалования.



----- - уровень начального столба жидкости

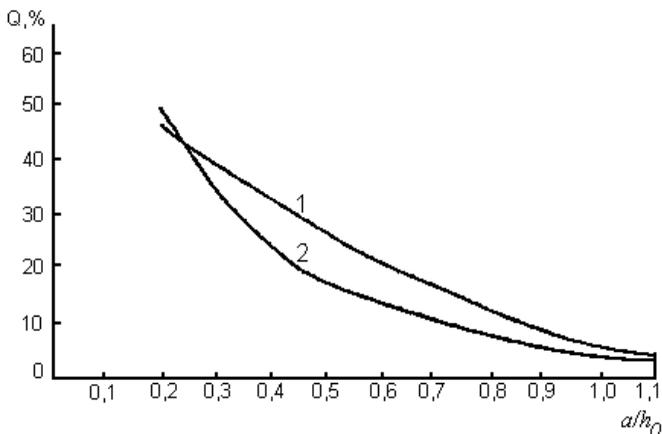
_____ - уровень жидкости в промежуточный момент времени (результаты расчета)

Рис. 4.2. Типичная картина движения жидкости в обваловании при квазимгновенном разрушении резервуара

Массовая доля жидкости Q (%), перелившейся через обвалование к моменту времени T , описывается выражением:

$$Q = 100 \cdot \frac{\int_0^T u_N (h_N - a) dt}{h_0 \cdot R}, \quad (3.22)$$

где u_N – средняя по высоте скорость движения столба жидкости при $x = b$, м/с; h_N – высота столба жидкости при $x = b$, м; h_0 – начальная высота столба жидкости в резервуаре, м; R – ширина резервуара, м.



1 – расчет; 2 – эксперимент

Рис. 4.3. Зависимость доли перелившейся через обвалование жидкости Q от параметра a/h_0 :

Масса перелившейся через обвалование жидкости может быть рассчитана по формуле:

$$\frac{M_P}{M_O} = 0,35 \left[0,9 + \left(\frac{R}{L} \right)^2 - \frac{a}{h_0} \right]^3, \quad (4.23)$$

где M_O и M_P – масса пролитой и перелившейся жидкости соответственно, кг.

Начальную высоту столба жидкости в резервуаре h_0 можно определить по формуле:

$$h_0 = V_{pez} / \pi \left(\frac{D_{pez}}{2} \right)^2, \quad (4.24)$$

где V_{pez} – объем хранимого в резервуаре вещества, m^3 ; D_{pez} – диаметр резервуара, м.

Пример. Определить долю перелившейся через обвалование ЛВЖ при следующих условиях: высота обвалования составляет $a = 3,5$ м; объем хранимого продукта в резервуаре $V_{рез} = 10\,000$ м³; диаметр резервуара $D_{рез} = 34$ м.

$$h_0 = V_{рез} / \pi \left(\frac{D_{рез}}{2} \right)^2 = 10000 / 3,14 \left(\frac{34}{2} \right)^2 = 11,0 \text{ м}$$

Значение параметра a / h_0 составляет 0,32.

По рис. 4.3 (кривая 1) определяем долю перелившейся через обвалование ЛВЖ – 38 %.

5. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА МАССЫ ГОРЮЧИХ ВЕЩЕСТВ, ПОСТУПАЮЩИХ В ОКРУЖАЮЩЕЕ ПРОСТРАНСТВО В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОЖАРООПАСНЫХ СИТУАЦИЙ

5.1. Общие положения

Количество поступивших в окружающее пространство горючих веществ, которые могут образовать взрывоопасные газопаровоздушные смеси или проливы горючих сжиженных газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей на подстилающей поверхности, определяется, исходя из следующих предпосылок:

а) происходит расчетная авария одного из резервуаров (аппаратов) или трубопровода;

б) все содержимое резервуара (аппарата, трубопровода) или часть продукта (при соответствующем обосновании) поступает в окружающее пространство. При этом в случае наличия на объекте нескольких аппаратов (резервуаров) расчет следует проводить для каждого резервуара (аппарата);

в) при разгерметизации резервуара (аппарата) происходит одновременно утечка веществ из трубопроводов, питающих резервуар по прямому и обратному потоку в течение времени, необходимого для отключения трубопроводов. Расчетное время отключения трубопроводов определяется в каждом конкретном случае, исходя из реальной обстановки, и должно быть минимальным с учетом паспортных данных на запорные устройства и их надежности, характера технологического процесса и вида расчетной аварии. Под «временем отключения» следует понимать промежуток времени от начала возможного поступления горючего вещества из трубопровода (перфорация, разрыв, изменение номинального давления и т.п.) до полного прекращения поступления горючего вещества в окружающее пространство.

г) в качестве расчетной температуры при пожароопасной ситуации с наземнорасположенным оборудованием допускается принимать максимально возможную температуру воздуха в со-

ответствующей климатической зоне, а при пожароопасной ситуации с подземнорасположенным оборудованием – температуру грунта, условно равную максимальной среднемесячной температуре окружающего воздуха в наиболее теплое время года;

е) длительность испарения жидкости с поверхности пролива принимается равной времени ее полного испарения, но не более 3600 с. Для относительно небольших проливов жидкости (до 20 кг) время испарения допускается принимать равным 900 с, поскольку столь небольшие проливы могут быть достаточно эффективно удалены обслуживающим персоналом.

Допускается использование официально опубликованных справочных данных по пожароопасным свойствам веществ и материалов.

Допускается использование показателей пожаро-взрывоопасности для смесей веществ и материалов по наиболее опасному компоненту.

5.2. Разгерметизация наземного резервуара

Масса жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара, определяется по формуле:

$$m_a = \rho_L \cdot V_R, \quad (5.1)$$

где m_a – масса жидкости, кг; ρ_L – плотность жидкости, кг/м³; V_R – объем жидкости в резервуаре, м³.

Масса жидкости, поступившей самотеком при полном разрушении наземного или наземного трубопровода, выходящего из резервуара, определяется по формуле:

$$m_a = G_L \cdot \tau + \frac{\pi}{4} \cdot d_P^2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n L_i \right) \cdot \rho_L; \quad (5.2)$$

$$G_L = \mu \frac{\pi}{4} \cdot d_P^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_L \cdot \Delta P_R}; \quad (5.3)$$

$$\Delta P_R = h_L \cdot \rho_L \cdot g, \quad (5.4)$$

где G_L – начальный расход жидкости, истекающей из резервуара через разгерметизированный трубопровод, кг/с; μ – коэффициент истечения; τ – расчетное время отключения трубопроводов, связанных с местом разгерметизации, с; d_P – диаметр трубопроводов, м (в случае различных диаметров трубопроводов, связанных с местом разгерметизации, объем выходящей жидкости рассчитывается для каждого трубопровода в отдельности); L_i – длина i -го участка трубопровода от запорного устройства до места разгерметизации, м; n – число участков трубопроводов, связанных с местом разгерметизации; ΔP_R – напор столба жидкости в резервуаре, Па; h_L – высота столба жидкости (от верхнего уровня жидкости в резервуаре до уровня места разгерметизации), м; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ($g = 9,81$).

При проливе на неограниченную поверхность площадь пролива $F_{ПП}$ (м^2) жидкости определяется по формуле:

$$F_{ПП} = f_P V_{Ж}, \quad (5.5)$$

где f_P – коэффициент разлития, м^{-1} (при отсутствии данных допускается принимать равным 5 м^{-1} при проливе на неспланированную грунтовую поверхность, 20 м^{-1} при проливе на спланированное грунтовое покрытие, 150 м^{-1} при проливе на бетонное или асфальтовое покрытие); $V_{Ж}$ – объём жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара, м^3 .

5.3. Масса паров ЛВЖ, выходящих через дыхательную арматуру

В случае наполнения резервуара массу паров вычисляют по формуле:

$$m_V = \rho_V \cdot V_R \cdot P_S / P_0; \quad (5.6)$$

$$\rho_V = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_0)}, \quad (5.7)$$

где m_V – масса выходящих паров ЛВЖ, кг; ρ_V – плотность паров ЛВЖ, кг/м³; P_S – давление насыщенных паров ЛВЖ при расчетной температуре, кПа, определяемое по справочным данным; P_0 – атмосферное давление, кПа (допускается принимать равным 101); V_R – геометрический объем резервуара, м³; M – молярная масса паров ЛВЖ, кг/кмоль; V_0 – мольный объем, равный 22,413 м³/кмоль; t_0 – расчетная температура, °С.

5.4. Масса паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности в резервуаре

Массу паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности в резервуаре вычисляют по формуле:

$$m_V = G_V \cdot \tau_E, \quad (5.8)$$

где G_V – расход паров ЛВЖ, кг/с, определяемый соотношением:

$$G_V = F_R \cdot W, \quad (5.9)$$

где τ_E – время поступления паров из резервуара, с; F_R – максимальная площадь поверхности испарения ЛВЖ в резервуаре, м²; W – интенсивность испарения ЛВЖ, кг/(м²·с).

Интенсивность испарения W для ненагретых выше расчетной температуры окружающей среды жидкостей определяется по формуле:

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_H, \quad (5.10)$$

где η – коэффициент, принимаемый для помещений по табл. 5.1 в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения. При проливе жидкости вне помещения допускается принимать $\eta = 1$; M – молекулярная масса

жидкости, кг/кмоль; P_H – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости, кПа.

Таблица 5.1

Значение коэффициента η от скорости и температуры воздушного потока

Скорость воздушного потока, м/с	Значение коэффициента η при температуре t ($^{\circ}\text{C}$) воздуха				
	10	15	20	30	35
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6

5.5. Оценка размеров взрывоопасных зон

Радиус $R_{НКПР}$ (м) и высота $Z_{НКПР}$ (м) зоны, ограничивающие область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени (далее - НКПР), при неподвижной воздушной среде определяется по формулам: для горючих газов (далее - ГГ)

$$R_{НКПР} = 7,8 \cdot \left(\frac{m_G}{\rho_G \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33} ; \quad (5.11)$$

$$Z_{НКПР} = 0,26 \cdot \left(\frac{m_G}{\rho_G \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33} ; \quad (5.12)$$

для паров ЛВЖ

$$R_{НКПР} = 7,8 \cdot \left(\frac{m_P}{\rho_P \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33} ; \quad (5.13)$$

$$Z_{НКПР} = 0,26 \cdot \left(\frac{m_{\Pi}}{\rho_{\Pi} \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33}, \quad (5.14)$$

где $m_{Г}$ – масса ГГ, поступившего в открытое пространство при пожароопасной ситуации, кг; $\rho_{Г}$ – плотность ГГ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м³; m_{Π} – масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время испарения, кг; ρ_{Π} – плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре, кПа; $C_{НКПР}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени ГГ или паров, % об.

За начало отсчета горизонтального размера зоны принимают геометрический центр пролива, а в случае, если $R_{НКПР}$ меньше габаритных размеров пролива, – внешние габаритные размеры пролива. При необходимости может быть учтено влияние различных метеорологических условий на размеры взрывоопасных зон.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СГОРАНИИ ГАЗО-, ПАРО-, ИЛИ ПЫЛЕВОЗДУШНОГО ОБЛАКА

Методика количественной оценки параметров воздушных волн сжатия при сгорании газо-, паро- или пылевоздушного облака (далее - облака) распространяется на случаи выброса горючих газов, паров или пыли в атмосферу на производственных объектах.

Основными структурными элементами алгоритма расчетов являются:

- определение ожидаемого режима сгорания облака;
- расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн для различных режимов;
- определение дополнительных характеристик взрывной нагрузки;
- оценка поражающего воздействия.

Исходными данными для расчета параметров волн сжатия при сгорании облака являются:

- вид горючего вещества, содержащегося в облаке;
- концентрация горючего вещества в смеси (C_T);
- стехиометрическая концентрация горючего вещества с воздухом (C_{CT});
- масса горючего вещества, содержащегося в облаке (M_T), с концентрацией между нижним и верхним концентрационным пределом распространения пламени. Допускается величину M_T принимать равной массе горючего вещества, содержащегося в облаке, с учетом коэффициента Z участия горючего вещества во взрыве. При отсутствии данных допускается коэффициент Z принимать равным 0,1. При струйном стационарном истечении горючего газа величину M_T следует рассчитывать с учетом стационарного распределения концентраций горючего газа в струе;
- удельная теплота сгорания горючего вещества ($E_{уд}$);
- скорость звука в воздухе C_0 (обычно принимается равной 340 м/с);

- информация о степени загроможденности окружающего пространства;
- эффективный энергозапас горючей смеси (E), вычисляемый по соотношению:

$$E = \begin{cases} M_{\Gamma} E_{\text{уд}}, & C_{\Gamma} \leq C_{\text{ст}}; \\ M_{\Gamma} E_{\text{уд}} \frac{C_{\text{ст}}}{C_{\Gamma}}, & C_{\Gamma} > C_{\text{ст}}. \end{cases} \quad (6.1)$$

Если определение концентрации горючего вещества в смеси затруднено, в качестве величины C_{Γ} в соотношении (6.1) принимается концентрация, соответствующая нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего.

При расчете параметров сгорания облака, расположенного на поверхности земли, величина эффективного энергозапаса удваивается.

6.1. Классификация горючих веществ по степени чувствительности

Вещества, способные к образованию горючих смесей с воздухом, по своей чувствительности к возбуждению взрывных процессов разделены на четыре класса.

Класс 1. Особо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки менее 2 см).

Класс 2. Чувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 2 до 10 см).

Класс 3. Средне чувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 10 до 40 см).

Класс 4. Слабо чувствительные вещества (размер детонационной ячейки больше 40 см).

Классификация наиболее распространенных в промышленном производстве горючих веществ приведена в табл. 6.1.

В случае, если вещество не внесено в классификацию, его следует классифицировать по аналогии с имеющимися в списке веществами, а при отсутствии информации о свойствах данного

вещества, его следует отнести к классу 1, т.е. рассматривать наиболее опасный случай.

Таблица 6.1

Классификация горючих веществ по степени чувствительности

<i>Класс 1</i>	<i>Класс 2</i>	<i>Класс 3</i>	<i>Класс 4</i>
Ацетилен	Акрилонитрил	Ацетальдегид	Бензол
Винилацетилен	Акролеин	Ацетон	Декан
Водород	Бутан	Бензин	о-Дихлорбензол
Гидразин	Бутилен	Винилацетат	Додекан
Изопропилнитрат	Бутадиен	Винилхлорид	Метан
Метилацетилен	1,3-Пентадиен	Гексан	Метилбензол
Нитрометан	Пропан	Изооктан	Метилмеркаптан
Окись пропилена	Пропилен	Метиламин	Метилхлорид
Окись этилена	Сероуглерод	Метилацетат	Окись углерода
Этилнитрат	Этан	Метилбутилкетон	Этиленбензол
	Этилен	Метилпропилкетон	
	Эфиры:	Метилэтилкетон	
	диметиловый	Октан	
	дивиниловый	Пиридин	
	метилбутиловый	Сероводород	
	ШФЛУ	Спирты:	
		метиловый	
		этиловый	
		пропиловый	
		амиловый	
		изобутиловый	
		изопропиловый	
		Циклогексан	
		Этилформиат	
		Этилхлорид	

При оценке масштабов поражения волнами сжатия необходимо учитывать различие химических соединений по теплоте сгорания, используемой для расчета полного запаса энергосыделения.

Для типичных углеводородов принимается в расчет значение удельной теплоты сгорания $E_{уд0} = 44$ МДж/кг. Для иных горючих веществ в расчетах используется удельное энергосыделение $E_{уд} = \beta E_{уд0}$. Здесь β – корректировочный параметр. Для

условно выделенных классов горючих веществ величины параметра β представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Значения корректировочного параметра для различных классов горючих веществ

Классы горючих веществ	β	Классы горючих веществ	β
<i>Класс 1</i>		<i>Класс 3</i>	
Ацетилен	1,1	Кумол	0,84
Метилацетилен	1,05	Метиламин	0,70
Винилацетилен	1,03	Спирты: метилловый этиловый пропиловый амиловый	0,45 0,61 0,69 0,79
Окись этилена	0,62		
Гидразин	0,44		
Изопропилнитрат	0,41		
Этилнитрат	0,30	Циклогексан	1
Водород	2,73	Ацетальальдегид	0,56
Нитрометан	0,25	Винилацетат	0,51
<i>Класс 2</i>		<i>Класс 4</i>	
Этилен	1,07	Метан	1,14
Диэтилэфир	0,77	Трихлорэтан	0,15
Дивинилэфир	0,77	Метилхлорид	0,12
Окись пропилена	0,7	Бензол	1
Акролеин	0,62	Декан	1
Сероуглерод	0,32	Додекан	1
Бутан	1	Метилбензол	1
Бутилен	1	Метилмеркаптан	0,53
Бутадиен	1	Окись углерода	0,23
1,3-Пентадиен	1	Винилхлорид	0,42
Этан	1	Сероводород	0,34
Диметилэфир	0,66	Ацетон	0,65
Диизопропилэфир	0,82		
ШФЛУ	1		
Пропилен	1		
Пропан	1		
<i>Класс 3</i>			
		Дихлорэтан	0,24
		Дихлорбензол	0,42
		Трихлорэтан	0,14

6.2. Классификация окружающего пространства по степени загроможденности

В связи с тем, что характер загроможденности окружающего пространства в значительной степени определяет скорость распространения пламени при сгорании облака и, следовательно, параметры волны сжатия, то все характеристики загроможденности окружающего пространства разделены на четыре класса.

Класс I. Наличие длинных труб, полостей, каверн, заполненных горючей смесью, при сгорании которой возможно ожидать формирование турбулентных струй продуктов сгорания с размером не менее трех размеров детонационной ячейки данной смеси. Если размер детонационной ячейки для данной смеси не известен, то минимальный характерный размер струй принимается равным 5 см для веществ класса 1; 20 см для веществ класса 2; 50 см для веществ класса 3 и 150 см для веществ класса 4.

Класс II. Сильно загроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий,

Класс III. Средне загроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк.

Класс IV. Слабо загроможденное и свободное пространство.

6.3. Классификация режимов сгорания облака

Для оценки воздействия сгорания облака возможные режимы сгорания разбиты на шесть классов по диапазонам скоростей их распространения

Класс 1. Детонация или горение со скоростью фронта пламени 500 м/с и более.

Класс 2. Дефлаграция, скорость фронта пламени 300–500 м/с.

Класс 3. Дефлаграция, скорость фронта пламени 200–300 м/с.

Класс 4. Дефлаграция, скорость фронта пламени 150–200 м/с.

Класс 5. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$u = k_1 \cdot M^{1/6}, \quad (6.2)$$

где k_1 – константа, равная 43; M – масса горючего вещества, содержащегося в облаке, кг.

Класс 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$u = k_2 \cdot M^{1/6}, \quad (6.3)$$

где k_2 – константа, равная 26.

Ожидаемый режим сгорания облака определяется с помощью табл. 6.3, в зависимости от класса горючего вещества и класса загроможденности окружающего пространства.

Таблица 6.3

Экспертная таблица для определения режима сгорания облака

Класс горючего вещества	Класс загроможденности окружающего пространства			
	I	II	III	IV
1	1	1	2	3
2	1	2	3	4
3	2	3	4	5
4	3	4	5	6

При определении максимальной скорости фронта пламени для режимов сгорания 2–4 классов дополнительно рассчитывается видимая скорость фронта пламени по соотношению (6.2). В том случае, если полученная величина больше максимальной скорости, соответствующей данному классу, она принимается за верхнюю границу диапазона ожидаемых скоростей сгорания облака.

6.4. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн давления

Параметры воздушных волн сжатия (избыточное давление ΔP и импульс фазы сжатия Γ^+) в зависимости от расстояния от центра облака рассчитываются исходя из ожидаемого режима сгорания облака.

Класс 1 режима сгорания облака

Рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние по соотношению:

$$R_x = R / (E/P_0)^{1/3}, \quad (6.4)$$

где R – расстояние от центра облака, м, P_0 – атмосферное давление, Па, E – эффективный энергозапас смеси, Дж.

Рассчитываются величины безразмерного давления (P_x) и импульс фазы сжатия (I_x) по формулам (для газопаровоздушных смесей):

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66(\ln(R_x)) + 0,260 \ln(R_x)^2, \quad (6.5)$$

$$\ln(I_x) = -3,4217 - 0,898(\ln(R_x)) - 0,0096 \ln(R_x)^2. \quad (6.6)$$

Зависимости (6.5, 6.6) справедливы для значений R_x более $R_k = 0,2$. В случае, если $R_x < R_k$, то P_x полагается равным 18, а в выражение (6.6) вместо R_x подставляется величина $R_x = 0,14$.

Вычисляются размерные величины избыточного давления и импульса фазы сжатия по формулам:

$$\Delta P = P_x P_0, \quad (6.7)$$

$$\Gamma^+ = I_x \cdot P_0^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0. \quad (6.8)$$

Классы 2 - 6 режима сгорания облака

Рассчитывается безразмерное расстояние R_x от центра облака по формуле (6.4). Рассчитываются величины безразмерного давления (P_{x1}) и импульса фазы сжатия (I_{x1}) по формулам:

$$P_{x1} = \left(\frac{u^2}{C_0^2} \right) \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left(\frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right); \quad (6.9)$$

$$I_{x1} = W(1 - 0,4W) \left(\frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right); \quad (6.10)$$

$$W = \frac{u}{C_0} \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma} \right), \quad (6.11)$$

где σ – степень расширения продуктов сгорания (для газопаровоздушных смесей допускается принимается равным 7, для пылевоздушных смесей 4); u – видимая скорость фронта пламени, м/с.

В случае дефлагарации пылевоздушного облака величина эффективного энергозапаса умножается на коэффициент $(\sigma - 1)/\sigma$. Выражения (6.9) и (6.10) справедливы для значений R_x больших величины $R_{кр1} = 0,34$, в случае, если $R_x < R_{кр1}$, в выражения (6.9), (6.10) вместо R_x подставляется величина $R_{кр1}$.

Вычисляются размерные величины избыточного давления и импульса фазы сжатия по формулам (6.7), (6.8). При этом в выражения (6.7), (6.8) вместо P_x и I_x подставляются величины P_{x1} и I_{x1} .

6.5. Расчет волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом

Избыточное давление ΔP и импульс I^+ в волне давления, образующиеся при взрыве резервуара с перегретой ЛВЖ, ГЖ или СУГ в очаге пожара, определяются по формулам:

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \cdot \frac{m_{ПП}^{0,33}}{r} + 3 \cdot \frac{m_{ПП}^{0,66}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{ПП}}{r^3} \right), \quad (6.12)$$

$$I^+ = 123 \cdot \frac{m_{\text{ПР}}^{0,66}}{r}, \quad (6.13)$$

где $m_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{eff}}}{H_0}$, приведенная масса, кг; $H_0 = 4,52 \cdot 10^6$ Дж / кг (6.14)

r – расстояние от центра резервуара, м; E_{eff} – эффективная энергия взрыва, рассчитываемая по формуле:

$$E_{\text{eff}} = k \cdot C_p \cdot m \cdot (T - T_b), \quad (6.15)$$

где k – доля энергии волны сжатия (допускается принимать равной 0,5); C_p – удельная теплоемкость жидкости (допускается принимать равной 2000 Дж/(кг К)); m – масса ЛВЖ, ГЖ или СУГ, содержащаяся в резервуаре, кг; T – температура жидкой фазы, К; T_b – нормальная температура кипения, К.

При наличии в резервуаре предохранительного устройства (клапана или мембраны) величина T определяется по формуле:

$$T = \frac{B}{A - \lg P_{\text{val}}} - C_A + 273,15, \quad (6.16)$$

где P_{val} – давление срабатывания предохранительного устройства; A , B , C_A – константы уравнения зависимости давления насыщенных паров жидкости от температуры (константы Антуана), определяемые по справочной литературе. Единицы измерения P_{val} (кПа, мм рт. ст., атм) должны соответствовать используемым константам Антуана.

7. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЖАРА ПРОЛИВА И ОГНЕННОГО ШАРА

7.1. Пожар пролива

Интенсивность теплового излучения q (кВт/м²) для пожара пролива ЛВЖ, ГЖ, сжиженного природного газа (далее – СПГ) или СУГ определяется по формуле:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (7.1)$$

где E_f – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²; F_q – угловой коэффициент облученности; τ – коэффициент пропускания атмосферы.

Значение E_f принимается на основе имеющихся экспериментальных данных или по табл. 7.1.

Таблица 7.1

Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени
в зависимости от диаметра очага и удельная
массовая скорость выгорания для некоторых
жидких углеводородных топлив

Топливо	E_f , кВт/м ² , при d, м					m' кг/(м ² с)
	10	20	30	40	50	
СПГ	220	180	150	130	120	0,08
СУГ (пропан- бутан)	80	63	50	43	40	0,1
Бензин	60	47	35	28	25	0,06
Дизельное топливо	40	32	25	21	18	0,04

Примечание: для диаметров очага менее 10 м или более 50 м следует принимать такой же, как и для очагов диаметром 10 м и 50 м соответственно.

При отсутствии данных для нефти и нефтепродуктов допускается величину E_f (кВт/м²) определять по формуле:

$$E_f = 140 \cdot e^{-0,12 \cdot d} + 20 \cdot (1 - e^{-0,12 \cdot d}), \quad (7.2)$$

где d – эффективный диаметр пролива, м.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину E_f (кВт/м²) определять по формуле:

$$E_f = \frac{0,4 \cdot m' \cdot H_{CF}}{\left(1 + 4 \cdot \frac{L}{d}\right)}, \quad (7.3)$$

где m' – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м² · с); H_{CF} – удельная теплота сгорания, кДж/кг; L – длина пламени, м.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину m' (кг/(м² с)) определять по формуле:

$$m' = \frac{0,001 \cdot H_{CF}}{L_g + C_p (T_b - T_a)}, \quad (7.4)$$

где L_g – удельная теплота испарения жидкости, кДж/кг; C_p – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·К); T_b – температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К; T_a – температура окружающей среды, К.

Для многокомпонентных смесей жидкостей допускается определение значений E_f и m' по компонентам, для которых величины E_f и m' максимальны.

Угловой коэффициент облученности F_q определяется по формуле:

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (7.5)$$

где F_V , F_H – факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок соответственно, определяемые для площадок,

расположенных в 90° секторе в направлении наклона пламени, по следующим формулам:

$$F_v = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & -E \cdot \operatorname{arctg} D + E \cdot \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) + \\ & + \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \end{aligned} \right\}; \quad (7.6)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \cdot \left[\operatorname{arctg} \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \left(\frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] - \\ & - \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) \end{aligned} \right\}; \quad (7.7)$$

$$a = \frac{2 \cdot L}{d}; \quad (7.8)$$

$$b = \frac{2 \cdot X}{d}; \quad (7.9)$$

$$A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin \theta)}; \quad (7.10)$$

$$B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin \theta)} \quad (7.11)$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2 \theta)}; \quad (7.12)$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{b-1}{b+1} \right)}; \quad (7.13)$$

$$E = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta}; \quad (7.14)$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)}; \quad (7.15)$$

где X – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м; d – эффективный диаметр пролива, м; L – длина пламени, м; θ – угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра, рад.

Для площадок, расположенных вне указанного сектора, а также в случаях отсутствия ветра факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок рассчитываются по формулам 7.6–7.15 и 7.18, принимая $\theta = 0$. Допускается в этих случаях, а также в случаях возникновения пожара в котлованах при аварии на продуктопроводах расчет интенсивности теплового излучения производить согласно [4].

Эффективный диаметр пролива d (м) рассчитывается по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}}; \quad (7.16)$$

где F – площадь пролива, м².

Длина пламени L (м) определяется по формулам:
при $u_* \geq 1$

$$L = 55 \cdot d \cdot \left(\frac{m'}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,67} \cdot u_*^{0,21}; \quad (7.17)$$

при $u_* < 1$

$$L = 42 \cdot d \cdot \left[\frac{m'}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right]^{0,61}; \quad (7.18)$$

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \cdot g \cdot d}{\rho_{\Pi}}}}, \quad (7.19)$$

где m' – удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м²·с); ρ_a – плотность окружающего воздуха, кг/м³; ρ_{Π} –

плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения, кг/м^3 ; w_0 – скорость ветра, м/с ; g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$).

Угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра θ , *рад.* рассчитывается по формуле:

$$\cos \theta = \begin{cases} 1, & \text{при } u_* < 1 \\ u_*^{-0,5}, & \text{при } u_* \geq 1 \end{cases} \quad (7.20)$$

Коэффициент пропускания атмосферы τ для пожара пролива определяется по формуле:

$$\tau = \exp[-7 \cdot 10^{-4} \cdot (X - 0,5 \cdot d)]. \quad (7.21)$$

7.2. Огненный шар

Интенсивность теплового излучения q (кВт/м^2) для огненного шара определяется по формуле (7.1).

Величина E_f определяется на основе имеющихся экспериментальных данных. Допускается принимать E_f равной 350 кВт/м^2 [3].

Значение F_q определяется по формуле:

$$F_q = \frac{D_S^2}{4 \cdot (H^2 + r^2)}, \quad (7.22)$$

где H – высота центра огненного шара, м ; D_S – эффективный диаметр огненного шара, м ; r – расстояние от облучаемого объекта до точки на поверхности земли непосредственно под центром огненного шара, м .

Эффективный диаметр огненного шара D_S (м) определяется по формуле:

$$D_S = 6,48 \cdot m^{0,325}, \quad (7.23)$$

где m – масса продукта, поступившего в окружающее пространство, кг.

Величину H допускается принимать равной D_S .

Время существования огненного шара t_s (с) определяется по формуле:

$$t_s = 0,852 \cdot m^{0,26}. \quad (7.24)$$

Коэффициент пропускания атмосферы τ для огненного шара рассчитывается по формуле:

$$\tau = \exp[-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot (\sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_S}{2})]. \quad (7.25)$$

7.3. Методы оценки зон поражения при пожаре вспышке и факельном горении

В случае образования паровоздушной смеси в незагроможденном технологическим оборудованием пространстве и его зажигании относительно слабым источником (например, искрой) сгорание этой смеси происходит, как правило, с небольшими видимыми скоростями пламени. При этом амплитуды волны сжатия малы и могут не приниматься во внимание при оценке поражающего воздействия. В этом случае реализуется так называемый пожар-вспышка, при котором зона поражения высокотемпературными продуктами сгорания паровоздушной смеси практически совпадает с максимальным размером облака продуктов сгорания (т.е. поражаются в основном объекты, попадающие в это облако). Радиус воздействия высокотемпературных продуктов сгорания паровоздушного облака при пожаре-вспышке R_F определяется соотношением:

$$R_F = 1,2 \cdot R_{НКПР}, \quad (7.26)$$

где $R_{НКПР}$ – горизонтальный размер взрывоопасной зоны, определяемый по п. 5.5.

При струйном истечении сжатых горючих газов, паровой и жидкой фазы СУГ и СПГ возникает опасность образования диффузионных факелов.

Длина факела L (м) при струйном горении вычисляется по формуле:

$$L_F = K \cdot G^{0,4}, \quad (7.27)$$

где G – расход продукта, кг/с; K – эмпирический коэффициент, который при истечении сжатых газов принимается равным 12,5; при истечении паровой фазы СУГ или СПГ – 13,5; при истечении жидкой фазы СУГ СПГ, ЛВЖ и ГЖ равным 15.

Длина факела при струйном истечении горючих жидкостей определяется дальностью (высотой) струи жидкости.

Ширина факела D_F (м) при струйном горении вычисляется по формуле:

$$D_F = 0,15 \cdot L_F. \quad (7.28)$$

При проведении оценки пожарной опасности горящего факела при струйном истечении сжатых горючих газов, паровой и жидкой фазы СУГ, СПГ, ЛВЖ и ГЖ под давлением допускается принимать следующее:

- зона непосредственного контакта пламени с окружающими объектами определяется размерами факела;
- длина факела L_F не зависит от направления истечения продукта и скорости ветра;
- наибольшую опасность представляют горизонтальные факелы, условную вероятность реализации которых следует принимать равной 0,67;
- поражение человека в горизонтальном факеле происходит в 30° секторе с радиусом, равным длине факела;
- воздействие горизонтального факела на соседнее оборудование, приводящее к его разрушению (каскадному развитию аварии), происходит в 30° секторе, ограниченном радиусом, равным L_F ;

- за пределами указанного сектора на расстояниях от L_F до $1,5 L_F$ тепловое излучение от горизонтального факела составляет 10 кВт/м^2 ;

- тепловое излучение от вертикальных факелов может быть определено по формулам 7.1, 7.5–7.15 и 7.21, принимая L равным L_F , d равным D_F , θ равным 0 , а E_f по формулам 7.2–7.4 или таблице 7.1 в зависимости от вида топлива. При отсутствии данных и невозможности рассчитать E_f по представленным формулам допускается эту величину принимать равной 200 кВт/м^2 ;

- при истечении жидкой фазы СУГ или СПГ из отверстия с эквивалентным диаметром до 100 мм при мгновенном воспламенении происходит полное сгорание истекающего продукта в факеле без образования пожара пролива;

- область возможного воздействия пожара-вспышки при струйном истечении совпадает с областью воздействия факела (30° сектор, ограниченный радиусом, равным L_F);

- при мгновенном воспламенении струи газа возможность формирования волн давления допускается не учитывать.

8. ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ И ВЕРОЯТНОСТНЫЕ КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ПОРАЖАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ И ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛЮДЕЙ

Детерминированные критерии показывают значения параметров опасного фактора, при которых наблюдается тот или иной уровень поражения людей или разрушения зданий и оборудования.

В случае использования детерминированных критериев условная вероятность поражения принимается равной 1, если значение критерия превышает предельно-допустимый уровень, и равной 0, если значение критерия не превышает предельно допустимый уровень поражения людей или разрушения зданий и оборудования.

Вероятностные критерии показывают, какова условная вероятность поражения людей или разрушения зданий и оборудования при заданном значении опасного фактора.

8.1. Критерии поражения людей волной давления

Детерминированные критерии поражения людей и зданий избыточным давлением при сгорании газо-, паро- или пылевоздушных смесей в помещениях или на открытом пространстве приведены в табл. 8.1.

В качестве вероятностного критерия поражения людей и/или зданий и сооружений используется понятие пробит-функции (probit-function). В общем случае пробит-функция P_r описывается выражением:

$$P_r = a + b \cdot \ln S, \quad (8.1)$$

где a, b – константы, зависящие от степени поражения и вида объекта; S – интенсивность воздействующего фактора.

Таблица 8.1

Типичные предельно допустимые значения избыточного давления с точки зрения повреждения зданий [5]

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Полное разрушение зданий	100
50 %-ное разрушение зданий	53
Средние повреждения зданий	28
Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т.п.)	12
Нижний порог повреждения человека волной давления	5
Малые повреждения (разбита часть остекления)	3

Соотношения между величиной P_r и условной вероятностью поражения человека приведены в табл. 8.2.

Для воздействия волны сжатия на человека, находящегося вне здания, выражения для пробит-функции имеют вид:

$$P_r = 5,0 - 5,74 \ln S ; \quad (8.2)$$

$$S = \frac{4,2}{\bar{P}} + \frac{1,3}{\bar{i}} ; \quad (8.3)$$

$$\bar{P} = \frac{\Delta P}{P_0} ; \quad (8.4)$$

$$\bar{i} = \frac{I^+}{P_0^{1/2} m^{1/3}} , \quad (8.5)$$

где m – масса тела человека (допускается принимать равной 70 кг), кг; ΔP – избыточное давление волны сжатия, Па; I^+ – импульс волны сжатия, Па·с; P_0 – атмосферное давление, Па.

Таблица 8.2

Связь вероятности поражения с пробит-функцией

Условная вероятность поражения, %	Величина пробит-функции Pr									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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	3,87	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	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
-	0,00	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Пробит-функции для разрушения зданий имеют вид:

- для тяжелых (средних) разрушений:

$$\text{Pr} = 5,0 - 0,26 \ln V; \quad (8.6)$$

$$V = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I^+} \right)^{9,3}; \quad (8.7)$$

- для полного(сильного) разрушения:

$$\text{Pr} = 5,0 - 0,22 \ln V; \quad (8.8)$$

$$V = \left(\frac{40000}{\Delta P} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I^+} \right)^{11,3}. \quad (8.9)$$

При оценке условной вероятности поражения человека, находящегося в здании следует использовать пробит-функцию, определяемую по выражениям (8.6)–(8.7). Условная вероятность поражения людей, попавших в зону действия ударной волны при нахождении их в селитебной зоне, а также на участках территории производственных объектов, характеризующихся наличием зданий и сооружений, оценивается по формулам (8.6), (8.7). При оценке условной вероятности поражения человека (состояние нокдауна) формулы (8.2)–(8.5) могут применяться согласно [13] только в отношении участков территории производственного объекта, на которых отсутствуют какие-либо здания, сооружения.

При взрывах ТВС внутри резервуаров и другого оборудования, содержащего газ под давлением следует учитывать опасность разлета осколков и последующее развитие аварии, сопровождаемое «эффектом домино» с распространением аварии на соседнее оборудование, если оно содержит опасные вещества.

Вероятность разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне определяется по формуле [6]:

$$D_{\pm} = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P. \quad (8.10)$$

Вероятность отброса людей волной давления оценивается по величине пробит-функции [6]:

$$P_v = 5 - 2,44 \ln V; \quad (8.11)$$

$$V = \frac{7,38 \cdot 10^3}{\Delta P} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{\Delta P \cdot I}. \quad (8.12)$$

При использовании пробит-функции в качестве зон 100 процентного поражения принимаются зоны поражения, где значение пробит-функции достигают величины, соответствующей вероятности 90 процентов. В качестве зон безопасных с точки зрения воздействия поражающих факторов, принимаются зоны поражения, где значение пробит-функции достигают величины, соответствующей вероятности 1 проценту.

Условная вероятность травмирования и гибели людей в зависимости от степени разрушения здания определяется по табл. 8.3 [6].

Таблица 8.3

Зависимость условий вероятности поражения человека с разной степенью тяжести от степени разрушения здания

Тяжесть поражения	Степень разрушения			
	Полное	Сильное	Среднее	Слабое
Смертельное	0,6	0,49	0,09	0
Тяжелые травмы	0,37	0,34	0,1	0
Легкие травмы	0,03	0,17	0,2	0,05

8.2. Критерии поражения тепловым излучением

При анализе воздействия теплового излучения следует различать случаи импульсного и длительного воздействия. В первом случае критерием поражения является доза излучения D (например, воздействие огненного шара), во втором - критическая интенсивности теплового излучения q_{CR} (например, воздействие пожара пролива).

Величины q_{CR} для воспламенения некоторых горючих материалов приведены в табл. П.4.3 [3], а для различных степеней поражения человека – в табл. 8.4.

Таблица 8.4

Предельно-допустимые значения интенсивности излучения для различных степеней поражения человека

Степень поражения	Интенсивность излучения, кВт/м ²
Без негативных последствий в течение длительного времени	1,4
Безопасно для человека в брезентовой одежде	4,2
Непереносимая боль через 20-30 с Ожог 1 степени через 15-20 с Ожог 2 степени через 30-40 с	7,0
Непереносимая боль через 3-5 с Ожог 1 степени через 6-8 с Ожог 2 степени через 12-16 с	10,5
Мгновенные болевые ощущения через 4 с	20,0
Летальный исход с вероятностью 50% при длительности воздействия около 10 с	44,5

В общем виде величина пробит-функции для оценки поражения человека тепловым излучением описывается выражением:

$$Pr = -12,8 + 2,56 \ln(D); \quad (8.13)$$

$$D = t \cdot q^{4/3}; \quad (8.14)$$

где t – эффективное время экспозиции, с; q – интенсивность теплового излучения, кВт/м².

Величина эффективного времени экспозиции t может быть вычислена по формулам:

• для огненного шара:

$$t = 0,92 \cdot m^{0,303}; \quad (8.15)$$

• для пожара пролива:

$$t = t_0 + \frac{x}{u}, \quad (8.16)$$

где m – масса горючего вещества, участвующего в образовании огненного шара, кг; t_0 – характерное время, за которое человек обнаруживает пожар и принимает решение о своих дальнейших действиях, с, (может быть принято равным 5); x – расстояние от места расположения человека до безопасной зоны (зона, где интенсивность теплового излучения меньше 4 кВт/м²); u – средняя скорость движения человека к безопасной зоне, м/с (может быть принята 5 м/с).

Условная вероятность поражения человека, попавшего в зону непосредственного воздействия пламени пожара пролива или факела, принимается равной 1.

9. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ОТ НАЧАЛА ПОЖАРА ДО БЛОКИРОВАНИЯ ЭВАКУАЦИОННЫХ ПУТЕЙ ОПАСНЫМИ ФАКТОРАМИ ПОЖАРА И РАСЧЕТНОГО ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ

9.1. Метод определения времени от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара

Время от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара определяется путем выбора из полученных в результате расчетов значений критической продолжительности пожара минимального времени:

$$\tau_{\text{бл}} = \min \{ t_{\text{КР}}^T, t_{\text{КР}}^{\text{П.В}}, t_{\text{КР}}^{\text{O}_2}, t_{\text{КР}}^{\text{T.Г}} \}. \quad (9.1)$$

Критическая продолжительность пожара по каждому из опасных факторов определяется как время достижения этим фактором критического значения на путях эвакуации на высоте 1,7 м от пола. Критические значения по каждому из опасных факторов составляют:

по повышенной температуре – +70 °С;

по тепловому потоку – 1400 Вт/м²

по потере видимости – 20 м;

по пониженному содержанию кислорода – 0,226 кг·м⁻³;

по каждому из токсичных газообразных продуктов горения: (СО₂ - 0,11 кг·м⁻³, СО - 1,16·10⁻³ кг·м⁻³, HCL - 23·10⁻⁶ кг·м⁻³).

Для описания термогазодинамических параметров пожара могут применяться три вида моделей: интегральные, зонные (зональные) и полевые. Выбор конкретной модели расчета времени блокирования путей эвакуации следует осуществлять, исходя из следующих предпосылок:

интегральный метод:

- для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;

- для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз);

- для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара;

зонный (зональный) метод:

- для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз), когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;

- для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (площадки обслуживания оборудования, внутренние этажерки и т.д.);

полевой метод:

- для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (например, многосветные пространства с системой галерей и примыкающих коридоров);

- для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые галереи и т.д.);

- для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара и т.д.).

При рассмотрении сценариев, связанных со сгоранием газо-, паро- или пылевоздушной смеси в помещении категории А или Б, условная вероятность поражения человека в этом помещении принимается равной 1 при сгорании газо-, паро- или пылевоздушной смеси в этом помещении до завершения эвакуации людей и 0 после завершения эвакуации людей.

Для помещения очага пожара, удовлетворяющего критериям применения интегрального метода, критическую продол-

жительность пожара $t_{кр}$ (с) по условию достижения каждым из опасных факторов пожара предельно допустимых значений в зоне пребывания людей (рабочей зоне) можно оценить по формулам:

по повышенной температуре:

$$t_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 + \frac{70 - t_o}{(273 + t_o) \cdot Z} \right] \right\}^{1/n} ; \quad (9.2)$$

по потере видимости:

$$t_{кр}^{н.в.} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{V \cdot \ln(1,05 \cdot \alpha \cdot E)}{l_{np} \cdot B \cdot D_m \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/n} ; \quad (9.3)$$

по пониженному содержанию кислорода:

$$t_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{0,044}{\left(\frac{B \cdot L_{O_2}}{V} + 0,27 \right) \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/n} ; \quad (9.4)$$

по каждому из газообразных токсичных продуктов горения:

$$t_{кр}^{m.z.} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{V \cdot X}{B \cdot L \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/n} ; \quad (9.5)$$

$$B = \frac{353 \cdot C_P \cdot V}{(1 - \varphi) \cdot \eta \cdot Q}, \quad (9.6)$$

где t_0 – начальная температура воздуха в помещении, °С; B – размерный комплекс, зависящий от теплоты сгорания материала и свободного объема помещения, кг; n – показатель степени, учитывающий изменение массы выгорающего материала во времени; A – размерный параметр, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего вещества и площадь пожара, кг/сⁿ; Z – безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения опасного фактора пожара по высоте помещения; Q – низшая теплота сгорания материала, МДж/кг; C_P – удельная изобарная теплоемкость воздуха, МДж/кг; φ – коэффициент теплопотерь; η – коэффициент полноты горения; V – свободный объем помещения, м³; α – коэффициент отражения предметов на путях эвакуации; E – начальное освещение, лк; $l_{пр}$ – предельная дальность видимости в дыму, м; D_m – дымообразующая способность горящего материала, Нп·м²/кг; L – удельный выход токсичных газов при сгорании 1 кг горючего вещества, кг/кг; X – предельно допустимое содержание токсичного газа в помещении, кг/м³; L_{O_2} – удельный расход кислорода, кг/кг.

Свободный объем помещения соответствует разности между геометрическим объемом и объемом оборудования или предметов, находящихся внутри. При отсутствии данных допускается свободный объем принимать равным 80 % геометрического объема помещения.

Если под знаком логарифма получается отрицательное число, то данный опасный фактор пожара может не учитываться. Параметр Z определяется по формуле:

$$Z = \frac{h}{H} \cdot \exp\left(1,4 \frac{h}{H}\right), \text{ при } H \leq 6 \text{ м}, \quad (9.7)$$

где h – высота рабочей зоны, м; H – высота помещения, м.

Высота рабочей зоны определяется по формуле:

$$h = h_{пл} + 1,7 - 0,5 \cdot \delta, \quad (9.8)$$

где $h_{пл}$ – высота площадки, на которой находятся люди, над полом помещения, м; δ – разность высот пола, равная нулю при горизонтальном его расположении, м.

Следует иметь в виду, что наибольшей опасности при пожаре подвергаются люди, находящиеся на более высокой отметке. При определении необходимого времени эвакуации следует ориентироваться на наиболее высоко расположенные в помещении участки возможного пребывания людей.

Параметры A и n определяются следующим образом:

- для случая горения жидкости с установившейся скоростью:

$$A = \Psi_F \cdot F, \text{ при } n = 1; \quad (9.9)$$

- для случая горения жидкости с неустановившейся скоростью:

$$A = \frac{0,67 \cdot \Psi_F \cdot F}{\sqrt{\tau_{ст}}}, \text{ при } n = 1,5; \quad (9.10)$$

- для случая кругового распространения пламени по поверхности горючего вещества или материала:

$$A = 1,05 \cdot \Psi_F \cdot v^2, \text{ при } n = 3; \quad (9.11)$$

- для вертикальной или горизонтальной поверхности горения в виде прямоугольника, одна из сторон которого увеличивается в двух направлениях за счет распространения пламени:

$$A = \Psi_F \cdot v \cdot b, \text{ при } n = 2, \quad (9.12)$$

где Ψ_F – удельная массовая скорость выгорания вещества, кг/(м²·с); F – площадь пролива жидкости; м²; τ_{CT} – время установления стационарного режима горения жидкости, с; v – линейная скорость распространения пламени, м/с; b – перпендикулярный к направлению движения пламени размер зоны горения, м.

При отсутствии данных значение τ_{CT} может быть принято в зависимости от температуры кипения жидкости [16]:

- для жидкостей с температурой кипения до 100 °С – 180 с;

- для жидкостей с температурой кипения от 101 до 150 °С – 240 с;

- для жидкостей с температурой кипения более 150 °С – 360 с.

Случай факельного горения в помещении может рассматриваться как горение жидкости с установившейся скоростью с параметром A равным массовому расходу истечения горючего вещества из оборудования и показателем степени n равным 1.

При отсутствии специальных требований значения α и E принимаются равными 0,3 и 50 лк соответственно, а $l_{ПР}$ равным 20 м. При расположении людей на различных по высоте площадках критическую продолжительность пожара следует определять для каждой площадки.

9.2. Метод определения расчетного времени эвакуации

Расчетное время эвакуации людей t_p из помещений и зданий устанавливаются по расчету времени движения одного или нескольких людских потоков через эвакуационные выходы от наиболее удаленных мест размещения людей непосредственно наружу или в безопасную зону.

При определении расчетного времени эвакуации учитывается пропускная способность всех имеющихся в помещениях, на этажах и в здании эвакуационных выходов. При расчете весь путь движения людского потока подразделяют на участки (проход, коридор, дверной проем, лестничный марш, тамбур) длиной l_i и шириной δ_i . Начальными участками являются проходы

между рабочими местами, оборудованием, рядами кресел и т.п. При определении расчетного времени эвакуации учитывается пропускная способность всех имеющихся в помещениях, на этажах и в здании эвакуационных выходов.

При определении расчетного времени длину и ширину каждого участка пути эвакуации для проектируемых зданий и сооружений принимают по проекту, а для построенных – по факту. Длину пути по лестничным маршам, а также по пандусам измеряют по длине марша. Длину пути в дверном проеме принимают равной нулю. Проем, расположенный в стене толщиной более 0,7 м, а также тамбур следует считать самостоятельными участками горизонтального пути, имеющими конечную длину l_i .

Расчетное время эвакуации людей t_p следует определять как сумму времени движения людского потока по отдельным участкам пути t_i по формуле

$$t_p = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_i, \quad (9.13)$$

где t_1 – время движения людского потока на первом (начальном) участке, мин; t_2, t_3, \dots, t_i – время движения людского потока на каждом из следующих после первого участка пути, мин.

Время движения людского потока по первому участку пути t_1 , мин, рассчитывают по формуле:

$$t_1 = \frac{l_1}{v_1}, \quad (9.14)$$

где l_1 – длина первого участка пути, м; v_1 – скорость движения людского потока по горизонтальному пути на первом участке, м/мин (определяют по табл. 9.1 в зависимости от плотности D).

Плотность однородного людского потока на первом участке пути D_1 рассчитывают по формуле

$$D_1 = \frac{N_1 \cdot f}{l_1 \cdot \delta_1}, \quad (9.15)$$

где N_1 – число людей на первом участке, чел; f – средняя площадь горизонтальной проекции человека, м², принимаемая равной 0,125; δ_1 – ширина первого участка пути, м.

Скорость v_i движения людского потока на участках пути, следующих после первого, принимают по таблице 9.1 в зависимости от интенсивности движения людского потока по каждому из этих участков пути, которую вычисляют для всех участков пути, в том числе и для дверных проемов, по формуле:

$$q_i = \frac{q_{i-1} \cdot \delta_{i-1}}{\delta_i}, \quad (9.16)$$

где δ_i, δ_{i-1} – ширина рассматриваемого i -го и предшествующего ему участка пути, м; q_i, q_{i-1} – интенсивности движения людского потока по рассматриваемому i -му и предшествующему участкам пути, м/мин.

Интенсивность движения людского потока на первом участке пути $q = q_{i-1}$ определяют по табл. 9.1 по значению D_1 , определенному по формуле (9.15). Если значение q_i определяемое по формуле (9.16), меньше или равно q_{max} , то время движения по участку пути t_i , мин, равно:

$$t_i = \frac{l_i}{v_i}, \quad (9.17)$$

при этом значения q_{max} , м/мин, следует принимать равными:

- 16,5 – для горизонтальных путей;
- 19,6 – для дверных проемов;
- 16,0 – для лестницы вниз;
- 11,0 – для лестницы вверх.

Если значение q_i , определенное по формуле (9.16), больше q_{max} , то ширину δ_i данного участка пути следует увеличивать на такое значение, при котором соблюдается условие:

$$q_i \leq q_{max}. \quad (9.18)$$

При невозможности выполнения условия (9.18) интенсивность и скорость движения людского потока по участку i определяют по табл. 9.1 при значении $D = 0,9$ и более. При этом следует учитывать время задержки движения людей из-за образовавшегося скопления.

Таблица 9.1

Интенсивность и скорость движения людского потока на разных участках путей эвакуации в зависимости от плотности потока

Плотность потока D , $\text{м}^2/\text{м}^2$	Горизонтальный путь		Дверной проем, интенсивность q , м/мин	Лестница вниз		Лестница вверх	
	Скорость v , м/мин	Интенсивность q , м/мин		Скорость v , м/мин	Интенсивность q , м/мин	Скорость v , м/мин	Интенсивность q , м/мин
0,01	100	1,0	1,0	100	1,0	60	0,6
0,05	100	5,0	5,0	100	5,0	60	3,0
0,10	80	8,0	8,7	95	9,5	53	5,3
0,20	60	12,0	13,4	68	13,6	40	8,0
0,30	47	14,1	16,5	52	15,6	32	9,6
0,40	40	16,0	18,4	40	16,0	26	10,4
0,50	33	16,5	19,6	31	15,6	22	11,0
0,60	28	16,3	19,05	24,5	14,1	18,5	10,75
0,70	23	16,1	18,5	18	12,6	15	10,5
0,80	19	15,2	17,3	13	10,4	13	10,4
0,90 и более	15	13,5	8,5	8	7,2	11	9,9

Примечание – Интенсивность движения в дверном проеме при плотности потока 0,9 и более, равная 8,5 м/мин, установлена для дверного проема шириной 1,6 м и более, а при дверном проеме меньшей ширины интенсивность движения следует определять по формуле $q = 2,5 + 3,75 \delta$

Время задержки $t_{зад}$ движения на участке i из-за образовавшегося скопления людей на границе с последующим участком $(i+1)$ определяется по формуле:

$$t_{зад}^i = N \cdot f \cdot \left(\frac{1}{q_D \cdot \delta_{i+1}} - \frac{1}{q_i \cdot \delta_i} \right); \quad (9.19)$$

где N – количество людей, чел; f – площадь горизонтальной проекции, m^2 ; q_D – интенсивность движения через участок $(i+1)$ при плотности 0,9 и более, м/мин; δ_{i+1} – ширина участка, м, при вхождении на который образовалось скопление людей; q_i – интенсивность движения на участке i , м/мин; δ_i – ширина предшествующего участка i , м.

Время существования скопления $t_{СК}$ на участке i определяется по формуле:

$$t_{СК} = \frac{Nf}{q_D b_{i+1}}. \quad (9.20)$$

Расчётное время эвакуации по участку i , в конце которого на границе с участком $(i+1)$ образовалось скопление людей, равно времени существования скопления $t_{СК}$. Расчётное время эвакуации по участку i допускается определять по формуле:

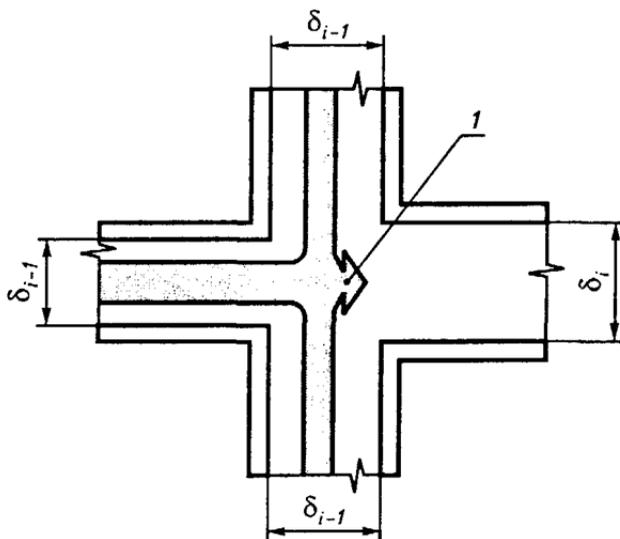
$$t_{i_i} = \frac{l_{i_i}}{v_{i_i}} + t_{зад} \quad (9.21)$$

При слиянии в начале участка i двух и более людских потоков (рис.9.1) интенсивность движения q_i , м/мин, рассчитывают по формуле

$$q_i = \frac{\sum q_{i-1} \cdot \delta_{i-1}}{\delta_i}, \quad (9.22)$$

где q_{i-1} – интенсивность движения людских потоков, сливающихся в начале участка i , м/мин; δ_{i-1} – ширина участков пути слияния, м; δ_i – ширина рассматриваемого участка пути, м.

Если значение q_i определенное по формуле (9.22), больше q_{max} то ширину δ_i , данного участка пути следует увеличивать на такое значение, чтобы соблюдалось условие (9.18). В этом случае время движения по участку i определяют по формуле (9.17).



1 – начало участка i

Рис. 9.1. Слияние людских потоков

10. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. Определить величину потенциального пожарного риска при возникновении пожара на дыхательной арматуре РВС-10000 для работника производственного объекта, находящегося на расстоянии $r' = 20$ м от него при скорости ветра $w_0 = 20$ м/с в направлении облучаемого. РВС цилиндрический с купольной крышкой без понтона, вид ЛВЖ – бензин АИ-93 (зимний). Защита РВС от нагрева, деформации и разрушения во время пожара осуществляется при помощи стационарных установок водяного орошения, в качестве которых предусмотрены кольца орошения. Суммарная формула бензина – $C_{6,911} \cdot H_{12,168}$; молярная масса – 95,3 кг/кмоль, температура кипения $t_k = 90$ °С; диаметр резервуара $d_{рез} = 34,2$ м; площадь поверхности $F = 918,2$ м². Температура воздуха в районе расположения объекта $t_0 = 37$ °С. Повторяемость ветра со скоростью выше 10 м/с и не более 20 м/с северного, восточного, южного и западного направлений составляет 15% или $P_{10-20 м/с} = 0,15$. Удельная массовая скорость выгорания бензина $m' = 0,06$ кг / (м² · с).

Решение

1. Принимаем, что пожар на дыхательной арматуре резервуара приводит к возникновению пожара резервуара по всей поверхности с условной вероятностью 100 %. Частота возникновения пожара по всей поверхности резервуара согласно табл. 1 (Приложение Б) равна $Q_{пож.пов.рез.} = 9,0 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹.

2. Определяем частоту реализации вышеуказанного сценария без возникновения вторичных факторов (взрыв, огненный шар) с учетом установок водяного орошения по формуле:

$$Q = Q_{пож.пов.рез.} \cdot P_{ор.} = 9,0 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1},$$

где $P_{ор} = 0,95$ - условная вероятность эффективного срабатывания системы противопожарной защиты, (Приложение.В, табл. 4).

3. Определяем частоту указанного пожара в условиях ветра со скоростью от 10 до 20 м/с при нахождении человека в сек-

торе 90^0 с вершиной в центре очага пожара в направлении ветра по формуле:

$$Q' = Q \cdot P_{10-20, \text{м/с}}(90^0/360^0) = 8,6 \cdot 10^{-5} \cdot 0,15 \cdot 1/4 = 0,32 \cdot 10^{-5} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

4. Эффективный диаметр пролива определяем по формуле (7.16):

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 918,2}{3,14}} = 34,2 \text{ м}$$

5. По формуле (5.7) определяем плотность окружающего воздуха ($\rho_{\dot{a}}$) при расчетной температуре и плотность насыщенных паров бензина ($\rho_{\dot{i}}$) при температуре кипения:

$$\rho_{\dot{a}} = \frac{\dot{I}}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_0)} = \frac{28,98}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 37)} = 1,15 \text{ \text{г/л}};$$

$$\rho_{\dot{i}} = \frac{\dot{I}}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_{\dot{e}})} = \frac{95,3}{22,4(1 + 0,00367 \cdot 90)} = 3,196 \text{ \text{г/л}}.$$

6. Параметр u_* определяем по формуле (7.19):

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \cdot g \cdot d}{\rho_{\dot{i}}}}} = \frac{20}{\sqrt[3]{\frac{0,06 \cdot 9,81 \cdot 34,2}{3,196}}} = 10,83$$

7. Следовательно, длина пламени L , определяемая по формуле (7.17) составит:

$$\begin{aligned}
 L &= 55 \cdot d \cdot \left(\frac{m'}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,67} \cdot u_*^{0,21} = \\
 &= 55 \cdot 34,2 \left(\frac{0,06}{1,15 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 34,2}} \right)^{0,67} \cdot 10,83^{0,21} = 61,13 \text{ м}
 \end{aligned}$$

8. Угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра θ рассчитываем по формуле (7.20):

$$\cos \theta = \begin{cases} 1, & \text{при } u_* < 1 \\ u_*^{-0,5}, & \text{при } u_* \geq 1 \end{cases}$$

$$\cos \theta = u_*^{-0,5} = 10,83^{-0,5} = 0,304$$

Следовательно, $\theta = \arccos(0,304) = 1,262 \text{ рад}$.

9. Расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта:

$$X = r' + 0,5d = 20 + 0,5 \cdot 34,2 = 37,1 \text{ м}$$

10. Параметры a, b, A, B, C, D, E, F определяем соответственно по формулам (7.8), (7.9), (7.10), (7.11), (7.12), (7.13), (7.14), (7.15):

$$a = \frac{2 \cdot L}{d} = \frac{2 \cdot 61,13}{34,2} = 3,575;$$

$$b = \frac{2 \cdot X}{d} = \frac{2 \cdot 37,1}{34,2} = 2,17;$$

$$A = \sqrt{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin \theta} = \\ = \sqrt{3,575^2 + (2,17+1)^2 - 2 \cdot 3,575 \cdot (2,17+1) \sin 1,262} = 1,112;$$

$$B = \sqrt{a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin \theta} = \\ = \sqrt{3,575^2 + (2,17-1)^2 - 2 \cdot 3,575 \cdot (2,17-1) \sin 1,262} = 2,486;$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2 \theta)} = \sqrt{(1 + (2,17^2 - 1) \cos^2 1,262)} = 1,159;$$

$$D = \sqrt{\left(\frac{b-1}{b+1}\right)} = \sqrt{\left(\frac{2,17-1}{2,17+1}\right)} = 0,607;$$

$$E = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta} = \frac{3,575 \cos 1,262}{2,17 - 3,575 \sin 1,262} = -0,879;$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)} = \sqrt{(2,17^2 - 1)} = 1,925.$$

11. Значение фактора облученности для вертикальной площадки F определяем по формуле (7.6):

$$\begin{aligned}
F_V &= \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ -E \cdot \operatorname{arctg} \cdot D + E \cdot \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left[\operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \right\} = \\
&= \frac{1}{3,14} \left\{ (-0,879) \cdot \operatorname{arctg}(0,607) + (-0,879) \cdot 90 \cdot \right. \\
&\quad \left[\frac{(3,575)^2 + (2,17+1)^2 - 2 \cdot 2/17 \cdot (1+3,575) \cdot \sin 1,262}{1,112 \cdot 2,486} \right] \cdot \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{1,112 \cdot 0,607}{2,486} \right) + \frac{\cos 1,262}{1,159} \times \\
&\quad \times \left[\operatorname{arccos} \cdot \left(\frac{3,575 \cdot 2,17 - (1,925)^2 \cdot \sin 1,262}{1,925 \cdot 1,159} \right) + \right. \\
&\quad \left. + \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{(1,925)^2 \cdot \sin 1,262}{1,925 \cdot 1,159} \right) \right] \left. \right\} = 0,228
\end{aligned}$$

12. Значение фактора облученности для горизонтальной площадки F_H определяем по формуле (7.7):

$$\begin{aligned}
F_H &= \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \cdot \left[\operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] - \right. \\
&\quad \left. - \left[\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{A \cdot D}{B} \right) \right\} = \\
&= \frac{1}{3,14} \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{1}{0,607} \right) + \frac{\sin 1,262}{1,159} \cdot \left[\operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{3,575 \cdot 2,17 - 1,925^2 \sin 1,262}{1,925 \cdot 1,159} \right) + \right. \\
&\quad \left. + \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{1,925^2 \cdot \sin 1,262}{1,925 \cdot 1,159} \right) \right] - \\
&= \frac{1}{3,14} \left[\frac{3,575^2 + (2,17+1)^2 - 2(2,17+1+3,575 \cdot 2,17 \sin 1,262)}{1,112 \cdot 2,486} \right] \cdot \operatorname{arctg} \cdot \left(\frac{1,112 \cdot 0,607}{2,486} \right) = \\
&= 0,822
\end{aligned}$$

13. Угловой коэффициент облученности F_q определяем по формуле (7.5):

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2} = \sqrt{0,228^2 + 0,822^2} = 0,853$$

14. Коэффициент пропускания атмосферы определяем по формуле (7.21):

$$\begin{aligned}\tau &= \exp[-7 \cdot 10^{-4} \cdot (X - 0,5 \cdot d)] = \\ &= \exp[-7 \cdot 10^{-4} (37,1 - 0,5 \cdot 34,2)] = 0,986\end{aligned}$$

Среднеповерхностную интенсивность теплового излучения пламени E_f принимаем в соответствии с табл. 7.1. Для рассматриваемого случая (диаметр пролива (очага пролива) – 34,2 м E_f находится методом линейной интерполяции приведенных в указанной таблице значений для диаметров очага 30 и 40 м и составляет $E_f = 32,06$ кВт/м².

15. Интенсивность теплового излучения пожара пролива бензина площадью F (пожар резервуара по всей поверхности) в точке, расположенной на расстоянии 20 м от границы очага пожара, при ветре со скоростью 20 м/с в направлении облучаемого объекта согласно формуле (7.1) составляет:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau = 32,06 \cdot 0,853 \cdot 0,986 = 26,96 \text{ кВт} / \text{м}^2$$

16. Согласно п. 8.2 для пожаров, связанных с горением резервуара по всей поверхности без возникновения вторичных пожаров, условную вероятность поражения человека, попавшего в зону непосредственного воздействия пламени пожара, принимаем равной 1, т.к. $q = 26,96 > q_H = 4$ кВт/м².

17. Величину потенциального пожарного риска для работника, находящегося на расстоянии 20 м от РВС-10000 при возникновении пожара по всей поверхности без возникновения

вторичных факторов в направлении ветра определяем по формуле (3.7):

$$P(a) = \sum_{j=1}^J Q_{dj}(a) Q_j = 1 \cdot 3,2 \cdot 10^{-4} = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$$

Пример 2. Определить потенциальный пожарный риск для человека, находящегося на расстоянии 100 м от обвалования, при полном разрушении РВС-5000 с бензином АИ-93 (зимний) с проливом в пределах обвалования и образованием взрывоопасного паровоздушного облака. Высота обвалования парка составляет $h = 3,0 \text{ м}$, а площадь обвалования $F_{\text{обв}} = 1780 \text{ м}^2$ (31 x 575 м). Физико-химические свойства обращающихся веществ следующие: суммарная формула – $C_{6,911}H_{12,168}$; молярная масса – 95,3 кг/кмоль; температура вспышки – минус 37 °С; константы уравнения Антуана в диапазоне температур – 60 ÷ 90 °С: $A=4,26511$, $B=695,019$, $C_a= 223,220$; НКПР – 1,1 % (об). Расчетная температура в климатической зоне размещения объекта $t_0 = 37^\circ \text{C}$. Повторяемость ветра со скоростью не более 1 м/с (повторяемость штиля) $P_{\text{штиля}}=0,12$.

Основными структурными элементами алгоритма расчета являются:

- определение частоты реализации данного сценария с учетом вероятности воспламенения как для двухфазной среды (п.2.3) и метеорологических условий в районе размещения объекта;
- определение массы горючего вещества, содержащегося в облаке;
- определение ожидаемого режима взрывного превращения;
- определение эффективного энергозапаса;
- расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн;
- оценка поражающего воздействия взрыва;
- оценка потенциального пожарного риска.

Решение:

1. Частоту реализации указанного сценария определяем по выражению:

$$Q_j = Q_{\text{полн. разруш. рез.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. разр.}}) \cdot P_{\text{штиля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. разр.}} \cdot P_{\text{обр. изб. давл.}} = 5,0 \cdot 10^{-6} (1 - 0,200) \cdot 0,12 \cdot 0,240 \cdot 0,600 = 6,9 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1}$$

2. Массу паров ЛВЖ, поступивших в окружающее пространство при испарении со свободной поверхности, определяем по формулам (5.8), (5.9) и (5.10):

$$m = F \cdot W \cdot \tau = 1780 \cdot 3,84 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 = 6409 \text{ кг}$$

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_H = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{95,3} \cdot 39,3 = 3,84 \cdot 10^{-4} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

$$P_H = 10^{\frac{A-B}{C_a + t_0}} = 10^{4,2651 - \frac{695,019}{223,220 + 37}} = 39,3 \text{ кПа}$$

3. Ожидаемый режим взрывного превращения определяется следующим образом:

- по табл. 6.1 определяем, что бензин относится к 3-му классу горючих веществ по степени чувствительности;

- характер загроможденности окружающего пространства (п.6.2) соответствует III классу;

- по табл. 6.3 определяем, что ожидаемый режим сгорания паровоздушного облака относится к 4-му диапазону – дефлаграция, скорость фронта пламени 150-200 м/с.

4. Видимую скорость фронта пламени u для рассматриваемого сценария определяем по формуле (6.2):

$$u = K \cdot M^{1/6} = 43 \cdot 6409^{1/6} = 185,32 \text{ м/с.}$$

Полученная величина не превышает максимальной скорости соответствующей данному классу (200 м/с). В дальнейших расчетах принимаем $u = 200$ м/с.

Расстояние от рассматриваемой точки до центра облака принимаем равным сумме расстояний до обвалования (100 м) и полуширины обвалования парка (15,5 м). Расстояние от центра облака принимаем равным $R = 115,5$ м.

5. Эффективный энергозапас определяем по формуле (6.1) с учетом удвоения энергозапаса:

$$E = M \cdot E_{y0} \cdot 2 = 6409 \cdot 44 \cdot 10^6 \cdot 2 = 5,64 \cdot 10^{11} \text{ Дж}$$

$$E_{y0} = \beta \cdot E_{y00} = 1 \cdot 44 \text{ Мдж / кг},$$

где β - корректировочный параметр, определяемый по табл. 6.2.

6. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных ударных волн производится в следующей последовательности:

- рассчитываем безразмерное расстояние R_x от центра облака по формуле (6.4):

$$R_x = R / (E / P_0)^{1/3} = 115,5 / (5,64 \cdot 10^{11} / 101325)^{1/3} = 0,652$$

Степень расширения продуктов сгорания σ для паровоздушной смеси согласно п. 6.4 принимаем $\sigma = 7$. Скорость звука принята $C_0 = 340$ м/с.

Величину безразмерного давления P_x рассчитываем по формуле (6.9):

$$P_x = \left(\frac{u^2}{C_0^2} \right) \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left(\frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right) = \left(\frac{200^2}{340^2} \right) \cdot \left(\frac{7-1}{7} \right) \cdot \left(\frac{0,83}{0,652} - \frac{0,14}{0,652^2} \right) = 0,269 \cdot$$

Параметр W определяем по формуле (6.11):

$$W = \frac{u}{C_0} \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) = \frac{200}{340} \cdot \left(\frac{7-1}{7} \right) = 0,504.$$

Величину безразмерного импульса фазы сжатия I_x определяем по формуле (6.10):

$$I_{x1} = W(1 - 0,4W) \left(\frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right) =$$

$$= 0,504 \cdot (1 - 0,504) \cdot \left(\frac{0,06}{0,652} + \frac{0,01}{0,652^2} + \frac{0,0025}{0,652^3} \right) = 0,054 \cdot$$

По формуле (6.7) определяем избыточное давление взрыва:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0 = 0,269 \cdot 101325 = 2,7 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

По формуле (6.8) определяем величину импульса фазы сжатия:

$$I^+ = I_x \cdot P_0^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0 = 0,054 \cdot 101325^{2/3} \cdot (5,64 \cdot 10^{11})^{1/2} /$$

$$/340 = 2850,4 \text{ Па} \cdot \text{с}$$

7. По формуле (8.7) рассчитываем фактор опасности V с учетом перепада давления в волне и импульса статического давления:

$$V = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I^+} \right)^{9,3} = \left(\frac{17500}{2,7 \cdot 10^4} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{2850} \right)^{9,3} = 0,03189.$$

8. По формуле (8.6) определяем значение пробит-функции:

$$P_r = 5 - 0,26 \ln V = 5 - 0,26 \ln 0,032 = 5,895.$$

9. Согласно табл. 8.2 полученному значению пробит-функции соответствует значение условной вероятности поражения 82 %. Таким образом, условная вероятность поражения че-

ловека волной давления для рассматриваемого случая равна $Q_d = 0,82$.

10. Величину потенциального пожарного риска для человека, находящегося на расстоянии 100 м от обвалования, определяем по формуле (3.7):

$$P_{(100)} = Q_j \cdot Q_d = 6,9 \cdot 10^{-8} \cdot 0,82 = 4,92 \cdot 10^{-8}.$$

Пример 3. Определить горизонтальный размер взрывоопасной зоны и радиус воздействия высокотемпературных продуктов сгорания паровоздушного облака при пожаре-вспышки, образующихся в результате испарения бензина с поверхности его пролива в пределах обвалования (исходные данные и определение массы паров ЛВЖ см. пример 2).

Решение:

1. Плотность паров бензина ρ_V при расчетной температуре определяем по формуле (5.7):

$$\rho_V = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_0)} = \frac{95,3}{22,43 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 37)} = 3,744 \text{ кг} / \text{м}^3$$

2. Горизонтальный размер взрывоопасной зоны, образующейся в результате испарения с поверхности пролива бензина в пределах обвалования, определяем по формуле (5.13):

$$R_{\text{НКПР}} = 7,8 \cdot \left(\frac{m_{\text{П}}}{\rho_{\text{П}} \cdot C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33} = 7,8 \cdot \left(\frac{6409}{3,744 \cdot 1,1} \right)^{0,33} = 88,2 \text{ м}$$

3. Радиус воздействия продуктов сгорания паровоздушного облака в случае пожара-вспышки для случая сгорания паровоздушного облака, образующегося в результате испарения с поверхности пролива бензина (площадь поверхности испарения $F = 1780 \text{ м}^2$) в пределах обвалования определяем по формуле (7.26):

$$R_F = 1,2 \cdot R_{\text{НКПР}} = 1,2 \cdot 88,2 = 105,8 \text{ м}$$

Пример 4. Определить величину потенциального пожарного риска P_a в определенной точке территории (a) на расстоянии 30 м от наружной установки, предназначенной для отделения факельного газообразного пропилена от возможной влаги. Емкость – сепаратор расположен на открытой площадке за ограждением факельной установки на расстоянии $L_2 = 75$ м (длина отводящего трубопровода) от факела и $L_1 = 700$ м (длина подводящего трубопровода) от наружной установки пропиленового холодильного цикла. На участках начала и конца подводящих и отводящих трубопроводов установлены автоматические задвижки (время срабатывания $\tau = 120\text{ñ}$). Диаметр подводящего и отводящего трубопроводов $d_{\text{од}1} = d_{\text{од}2} = 500\text{ мм}$. Объем емкости сепаратора $V_3 = 50\text{ м}^3$.

Давление газа $P = P_1 = P_2 = 2500\text{ кПа}$, расход газа $G = 40000\text{ кг} \cdot \text{ч}^{-1} = 11,1111\text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$, температура газа $t_1 = 60^\circ\text{C}$.

Молярная масса пропилена $M = 42,08\text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$. Химическая формула C_3H_6 . Удельная теплота сгорания пропилена $Q_{\text{сг}} = 45604\text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} = 45,604 \cdot 10^6\text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1}$.

Решение:

1. Частота разгерметизации Q (год^{-1}) емкости под давлением с последующим истечением для всех размеров утечек при различных диаметра d (м) истечения в соответствии с табл. 1 (Приложение Б) составляет:

$$\begin{aligned} d_1 &= 5 \cdot 10^{-3}\text{ м}, & Q_1 &= 4,0 \cdot 10^{-5}\text{ год}^{-1}; \\ d_2 &= 12,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}, & Q_2 &= 1,0 \cdot 10^{-5}\text{ год}^{-1}; \\ d_3 &= 25 \cdot 10^{-3}\text{ м}, & Q_3 &= 6,2 \cdot 10^{-6}\text{ год}^{-1}; \\ d_4 &= 50 \cdot 10^{-3}\text{ м}, & Q_4 &= 3,8 \cdot 10^{-6}\text{ год}^{-1}; \\ d_5 &= 100 \cdot 10^{-3}\text{ м}, & Q_5 &= 1,7 \cdot 10^{-6}\text{ год}^{-1}; \\ \text{полное разрушение} & & Q_6 &= 3,0 \cdot 10^{-7}\text{ год}^{-1}. \end{aligned}$$

2. Интенсивность истечения пропилена $G_{\text{ист}} (\text{кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1})$ в соответствии с исходными данными составляет:

$$G_{\text{исч}} = \frac{G}{0,785 \cdot d_{\text{пр}}^2} = \frac{11,1111}{0,785 \cdot 0,5^2} = 56,6170 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

3. Расход пропилена $G(\hat{e}\tilde{a} \cdot \tilde{n}^{-1})$ через различные диаметры истечения составляет:

$$G_1 = 0,785 \cdot d_1^2 \cdot G_{\text{исч}} = 0,785 \cdot 0,005^2 \cdot 56,617 = 1,1111 \cdot 10^{-3}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$G_2 = 0,785 \cdot d_2^2 \cdot G_{\text{исч}} = 0,785 \cdot 0,0125^2 \cdot 56,617 = 6,9444 \cdot 10^{-3}, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$G_3 = 0,785 \cdot d_3^2 \cdot G_{\text{исч}} = 0,785 \cdot 0,025^2 \cdot 56,617 = 0,0278, \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$G_4 = 0,785 \cdot d_4^2 \cdot G_{\text{исч}} = 0,785 \cdot 0,005^2 \cdot 56,617 = 1,1111 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$G_5 = 0,785 \cdot d_5^2 \cdot G_{\text{исч}} = 0,785 \cdot 0,1^2 \cdot 56,617 = 0,4444 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

$$G_6 = 0,785 \cdot d_6^2 \cdot G_{\text{исч}} = 0,785 \cdot 0,5^2 \cdot 56,617 = 11,1111 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1};$$

4. Масса пропилена m , поступающего в открытое пространство при разгерметизации емкости через различные диаметры истечения, составляет:

$$m_1 = G_1 \cdot \tau + 0,01 \cdot V_a \cdot P \cdot \rho_r = 1,1111 \cdot 10^{-3} \cdot 120 + \\ + 0,01 \cdot 50 \cdot 2500 \cdot 1,5387 = 0,13 + 1923,4 = 1923,5 \text{ кг};$$

$$m_2 = G_2 \cdot \tau + 0,01 \cdot V_a \cdot P \cdot \rho_r = 6,9444 \cdot 10^{-3} \cdot 120 + \\ + 1923,4 = 1924,2 \text{ кг}$$

$$m_3 = G_3 \cdot \tau + 0,01 \cdot V_a \cdot P \cdot \rho_r = 0,0278 \cdot 120 + \\ + 1923,4 = 1926,7 \text{ кг}$$

$$m_4 = G_4 \cdot \tau + 0,01 \cdot V_a \cdot P \cdot \rho_r = 0,1111 \cdot 120 + \\ + 1923,4 = 1976,7 \text{ кг}$$

$$m_5 = G_5 \cdot \tau + 0,01 \cdot V_a \cdot P \cdot \rho_r = 0,444 \cdot 120 + \\ + 1923,4 = 1976,7 \text{ кг}$$

$$m_6 = G_6 \cdot \tau + 0,01 \cdot V_a \cdot P \cdot \rho_r = 11,1111 \cdot 120 + \\ + 1923,4 = 3256,7 \text{ кг}$$

Плотность пропилена при $t = 60^{\circ} \text{C}$ определялась по формуле (5.7) и составила:

$$\rho_V = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_0)} = \frac{42,08}{22,413(1 + 0,00367 \cdot 60)} = \\ = 1,5387 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$$

Избыточное давление взрыва ΔD на расстоянии $r = 30$ м от наружной установки емкости-сепаратора при ее разгерметизации через различные диаметры истечения согласно формулам (В.14) и (В.15) [4] составит:

$$\Delta P_1 = P_0 \left(0,8 \cdot \frac{m_{\text{ПП}}^{0,33}}{r} + 3 \cdot \frac{m_{\text{ПП}}^{0,66}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{\text{ПП}}}{r^3} \right) =$$

$$= 101 \left(\frac{0,8 \cdot 1940,7^{0,33}}{30} + \frac{3 \cdot 1940,7}{30^2} + \frac{5 \cdot 1940,7}{30^3} \right) = 118,8 \text{ кПа};$$

$$m_{\text{ПП1}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_0} m_1 \cdot Z = \frac{45,604 \cdot 10^6}{4,52 \cdot 10^6} \cdot 1923,5 \cdot 0,1 = 1940,7 \text{ кг};$$

$$m_{\text{ПП2}} = 1,009 \cdot 1924,2 = 1941,4 \text{ кг};$$

$$\Delta P_2 = 101 \cdot \left(\frac{0,8 \cdot 1941,4^{0,33}}{30} + \frac{3 \cdot 1941,4}{30^2} + \frac{5 \cdot 1941,4}{30^3} \right) = 118,9 \text{ кПа};$$

$$\Delta P_3 = 101 \cdot \left(\frac{0,8 \cdot 1944^{0,33}}{30} + \frac{3 \cdot 1944}{30^2} + \frac{5 \cdot 1944}{30^3} \right) = 119,0 \text{ кПа};$$

$$m_{\text{ПП3}} = 1,009 \cdot 1926,7 = 1944 \text{ кг}$$

$$\Delta P_4 = 101 \cdot \left(\frac{0,8 \cdot 1954^{0,33}}{30} + \frac{3 \cdot 1954}{30^2} + \frac{5 \cdot 1954}{30^3} \right) = 119,4 \text{ кПа};$$

$$m_{\text{ПП4}} = 1,009 \cdot 1936,7 = 1954 \text{ кг}$$

$$\Delta P_5 = 101 \cdot \left(\frac{0,8 \cdot 1944^{0,33}}{30} + \frac{3 \cdot 1994}{30^2} + \frac{5 \cdot 1994}{30^3} \right) = 121,0 \text{ кПа};$$

$$m_{\text{ПП5}} = 1,009 \cdot 1976,7 = 1994 \text{ кг}$$

$$\Delta P_6 = 101 \cdot \left(\frac{0,8 \cdot 3286^{0,33}}{30} + \frac{3 \cdot 3286}{30^2} + \frac{5 \cdot 3286}{30^3} \right) = 171,0 \text{ кПа};$$

$$m_{\text{ПП6}} = 1,009 \cdot 3256,7 = 3286,0 \text{ кг}.$$

4. Импульс волны давления I^+ вычисляем по формуле (6.13) или (В.23) [4]:

$$I_1^+ = 123 \cdot \frac{m_{\text{ПП1}}^{0,66}}{r} = \frac{123 \cdot 1940,7^{0,66}}{30} = 606,5 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$I_2^+ = 123 \cdot \frac{m_{\text{ПП2}}^{0,66}}{r} = \frac{123 \cdot 1941,4^{0,66}}{30} = 606,6 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$I_3^+ = 123 \cdot \frac{m_{\text{ПП3}}^{0,66}}{r} = \frac{123 \cdot 1944,0^{0,66}}{30} = 607,2 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$I_4^+ = 123 \cdot \frac{m_{\text{ПП4}}^{0,66}}{r} = \frac{123 \cdot 1954,0^{0,66}}{30} = 609,2 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$I_5^+ = 123 \cdot \frac{m_{\text{ПП5}}^{0,66}}{r} = \frac{123 \cdot 1994,0^{0,66}}{30} = 617,4 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$I_6^+ = 123 \cdot \frac{m_{\text{ПП6}}^{0,66}}{r} = \frac{123 \cdot 3286,0^{0,66}}{30} = 858,6 \text{ Па} \cdot \text{с};$$

5. Определяем величину пробит-функции P_r по формулам (8.6) и (8.7):

$$\text{Pr}_1 = 5,0 - 0,26 \text{Ln}V = 5 - 0,26 \cdot \ln(1,047 \cdot 10^{-3}) = 6,78;$$

$$V_1 = \left(\frac{17500}{\Delta P_1} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I_1^+} \right)^{9,3} = \left(\frac{17500}{118800} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{606,5} \right)^{9,3} = 1,047 \cdot 10^{-3};$$

$$\text{Pr}_2 = 5,0 - 0,26 \text{Ln}V = 5 - 0,26 \cdot \ln(1,046 \cdot 10^{-3}) = 6,78;$$

$$V_2 = \left(\frac{17500}{118800} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{606,5} \right)^{9,3} = 1,046 \cdot 10^{-3};$$

$$\text{Pr}_3 = 5,0 - 0,26 \text{Ln}V = 5 - 0,26 \cdot \ln(1,036 \cdot 10^{-3}) = 6,79;$$

$$V_3 = \left(\frac{17500}{119000} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{607,2} \right)^{9,3} = 1,036 \cdot 10^{-3};$$

$$\text{Pr}_4 = 5,0 - 0,26 \text{Ln}V = 5 - 0,26 \cdot \ln(1,0005 \cdot 10^{-3}) = 6,79;$$

$$V_4 = \left(\frac{17500}{119400} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{609,2} \right)^{9,3} = 1,005 \cdot 10^{-3};$$

$$Pr_5 = 5,0 - 0,26LnV = 5 - 0,26 \cdot \ln(8,873 \cdot 10^{-3}) = 6,83;$$

$$V_5 = \left(\frac{17500}{121000} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{617,4} \right)^{9,3} = 8,873 \cdot 10^{-3};$$

$$Pr_6 = 5,0 - 0,26LnV = 5 - 0,26 \cdot \ln(4,131 \cdot 10^{-3}) = 7,62;$$

$$V_6 = \left(\frac{17500}{171000} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{858,6} \right)^{9,3} = 4,131 \cdot 10^{-3}.$$

6. По табл. (8.2) для полученных значений пробит-функции определяем условные вероятности поражения человека Q_d :

$$Q_{d1} = 0,962; \quad Q_{d2} = 0,962; \quad Q_{d3} = 0,963;$$

$$Q_{d4} = 0,963; \quad Q_{d5} = 0,966; \quad Q_{d6} = 0,996.$$

7. Пожарный риск $D(\dot{a})$ в определенной точке территории (а) , на расстоянии 30 м от наружной установки, вычисляем с помощью соотношения (3.7):

$$\begin{aligned} P(a) &= \sum_{j=1}^J Q_{dj}(a) Q_j = Q_{d1} \cdot Q_1 + Q_{d2} \cdot Q_2 + Q_{d3} \cdot Q_3 + \\ &+ Q_{d4} \cdot Q_4 + Q_{d5} \cdot Q_5 + Q_{d6} \cdot Q_6 = 0,962 \cdot 4,0 \cdot 10^{-5} + \\ &+ 0,962 \cdot 1,0 \cdot 10^{-5} + 0,963 \cdot 6,2 \cdot 10^{-6} + 0,963 \cdot 3,8 \cdot 10^{-6} + \\ &+ 0,966 \cdot 1,7 \cdot 10^{-6} + 0,996 \cdot 3,0 \cdot 10^{-7} = 3,848 \cdot 10^{-5} + \\ &+ 0,962 \cdot 10^{-5} + 5,971 \cdot 10^{-6} + 3,659 \cdot 10^{-6} + 1,642 \cdot 10^{-6} + \\ &+ 2,988 \cdot 10^{-7} = 5,967 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

Вывод. Величина пожарного риска при возможном сгорании пропилена с образованием волн давления превышает одну миллионную (10^{-6}) в год на расстоянии 30 м от наружной установки.

Пример 5. Определить величину потенциального пожарного риска в помещениях одноэтажной контроллерной управления технологическими процессами на производстве. В рассмат-

риваемом здании расположены: помещение контроллерной площадью $S = 45 \text{ м}^2$ (9,0 x 5,0 м); коридор $S = 20 \text{ м}^2$; тамбур $S = 4,5 \text{ м}^2$ (1,5x3,0 м). Высота помещений $H = 5,0$ м. Ширина дверных проемов составляет $a = 1,0$ м, а их высота $b = 2,0$ м. План рассматриваемого здания представлен на рис. 10.1.

Для расчета значений потенциального пожарного риска рассмотрен сценарий пожара, по которому пожар может возникнуть в помещении контроллерной. В контроллерной в течение рабочего дня находится один человек (оператор).

Решение:

1. Исходя из положений п. 33 «Методики...» [3] для определения времени от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара допускается дополнительно использовать методы, содержащиеся в методиках определения расчетных величин пожарного риска, утвержденных в установленном порядке. Расчет распространения опасных факторов пожара для сценария пожара № 1 проводится с помощью зонной модели пожара в здании в соответствии с «Методикой...» [17].

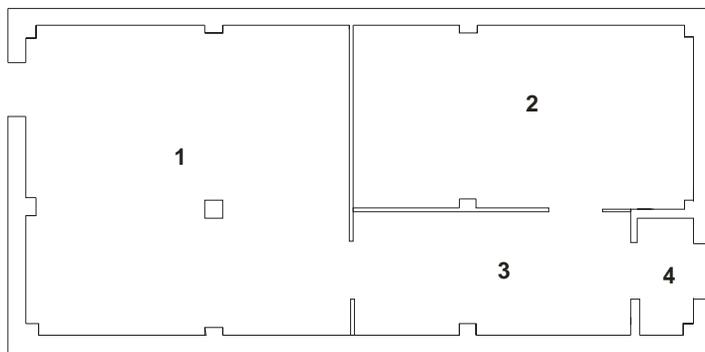


Рис. 10.1. План рассматриваемого здания:
1 – помещение контроллерной; 2 – помещение электрооборудования; 3 – коридор; 4 – тамбур.

2. *Описание сценария пожара.* Очаг пожара возникает в помещении контроллерной (рис. 10.1; поз.1). Пламя распространяется по горючим материалам помещения (электротехнические материалы, карболит, текстолит), очаг пожара распространяется по горизонтальной плоскости равномерно распределенного материала в виде круга. Над очагом пожара формируется конвективная колонка. Конвективная колонка, поднимаясь над очагом пожара, достигает потолка и растекается по нему веерной струей. Формируется задымленная зона, которая заполняет весь объем помещения. В результате распространения опасных факторов пожара блокируются опасными факторами пожара эвакуационные выходы из помещения.

3. Частоту возникновения пожара в рассматриваемом помещении принимаем с определенным запасом надежности как для электростанций $Q_j = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м} \cdot \text{год}^{-1}$, что в расчете на всю площадь помещения дает:

$$Q_j = 2,2 \cdot 10^{-5} \cdot 72 = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

4. Параметры для расчета по зонной модели принимаем следующими:

- низшая теплота сгорания	20,9 МДж/кг
- линейная скорость распространения пламени	0,0125 м/с
- удельная массовая скорость выгорания	0,0076 кг/(м ² ·с)
- дымообразующая способность	327 Нп·м ² /кг
- потребление кислорода O ₂	1,95 кг/кг
- коэффициент полноты сгорания	0,95
Выделение газа:	
- CO ₂	0,375 кг/кг
- CO	0,056 кг/кг
- HCl	0,0054 кг/кг

5. Расчетное время эвакуации оператора из помещения контроллерной до выхода в безопасную зону (коридор) определялось по формулам (9.14) и (9.15), табл. 9.1 и составило $t_p = 0,11 \text{ мин} = 6,6 \text{ с}$.

$$D_1 = \frac{N_1 \cdot f}{l_1 \cdot \delta_1} = \frac{1,0 \cdot 0,125}{11,0 \cdot 2,0} = 0,006 \text{ м}^2 / \text{м}^2;$$

$$V = 100 \text{ м} / \text{мин}; \quad t_p = \frac{11}{100} = 0,11 \text{ мин}$$

Время от начала пожара до начала эвакуации людей $\tau_{i,y}$ принимаем как для помещения очага пожара равным 0 с (п.32) [3].

6. По формуле (9.6) определяем размерный комплекс В:

$$B = \frac{353 \cdot C_P \cdot V}{(1-\phi) \cdot \eta \cdot Q} = \frac{353 \cdot 1,026 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 5}{(1-0,5) \cdot 0,95 \cdot 20,9} = 10,507 \text{ кг}$$

7. По формуле (9.11) определяем размерный параметр А для случая кругового распространения пламени:

$$A = 1,05 \cdot \Psi_F \cdot v^2 = 1,05 \cdot 0,0076 \cdot 0,0125^2 = 1,246 \cdot 10^{-6} \text{ кг} / \text{с}^3$$

8. По формуле (9.7) и (9.8) определяем безразмерный параметр Z, учитывающий неравномерность распределения опасного фактора пожара по высоте помещения при $H \leq 6$ м.

$$Z = \frac{h}{H} \cdot \exp\left(1,4 \frac{h}{H}\right) = \frac{1,7}{5,0} \exp\left(1,4 \frac{1,7}{5,0}\right) = 0,547$$

$$h = h_{nz} + 1,7 - 0,5\delta = 0 + 1,7 - 0,5 \cdot 0 = 1,7 \text{ м}$$

9. По формулам (9.2–9.5) рассчитываем критическую продолжительность пожара по условию достижения каждым из опасных факторов пожара предельно допустимых значений в зоне пребывания людей:

$$t_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[1 + \frac{70 - t_o}{(273 + t_o) \cdot Z} \right] \right\}^{1/n} =$$

$$\left\{ \frac{10,507}{1,246 \cdot 10^{-6}} \ln \left[1 + \frac{70 - 20}{(243 + 20) \cdot 0,547} \right] \right\}^{1/3} = 131,16c$$

$$t_{кр}^{n.в.} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{V \cdot \ln(1,05 \cdot \alpha \cdot E)}{l_{np} \cdot B \cdot D_m \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/n} =$$

$$= \left\{ \frac{10,507}{1,246 \cdot 10^{-6}} \ln \left[1 - \frac{0,8 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 5 \ln(1,05 \cdot 0,3 \cdot 50)}{20 \cdot 10,507 \cdot 327 \cdot 0,547} \right]^{-1} \right\}^{1/3} = 56,16c$$

$$t_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{0,044}{\left(\frac{B \cdot L_{O_2}}{V} + 0,27 \right) \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1,3} =$$

$$= \left\{ \frac{10,507}{1,246 \cdot 10^{-6}} \ln \left[\left(1 - \frac{0,44}{\left(\frac{10,507 \cdot 1,95}{0,8 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 5} + 0,27 \right) \cdot 0,547} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/3} = 143,7c$$

$$t_{кр}^{CO_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{V \cdot X}{B \cdot L \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/n} =$$

$$= \left\{ \frac{10,507}{1,246 \cdot 10^{-6}} \ln \left[\left(1 - \frac{0,8 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 5}{10,507 \cdot 0,375 \cdot 0,547} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/3} -$$

- не учитываем

$$t_{кр}^{CO_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[\left(1 - \frac{V \cdot X}{B \cdot L \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/n} =$$

$$= \left\{ \frac{10,507}{1,246 \cdot 10^{-6}} \ln \left[\left(1 - \frac{0,8 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 5}{10,507 \cdot 0,375 \cdot 0,547} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/3}$$

- не учитываем

$$t_{кр}^{HCl} = \left\{ \frac{10,507}{1,246 \cdot 10^{-6}} \ln \left[\left(1 - \frac{0,8 \cdot 9 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 23 \cdot 10^{-6}}{10,507 \cdot 0,0054 \cdot 0,547} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/3} =$$

$$= 126,18c$$

10. По выражению (9.1) определяем время блокирования путей эвакуации $\tau_{\text{бл}}$:

$$\tau_{\text{бл}} = \min \{ t_{кр}^T, t_{кр}^{П.г}, t_{кр}^{O_2}, t_{кр}^{T.Г.} \} = 56,2c$$

11. По формуле (3.4) определяем вероятность эвакуации по эвакуационным путям, предварительно проверяя, выполняется или нет условие соответствия:

$$t_p + t_{н.э.} \leq 0,8\tau_{\text{бл}}$$

$$6,6 + 0 \leq 0,8 \cdot 56,2 = 6,6c \leq 44,96c ;$$

$$P_{\text{Э.П.ц}} = 0,999$$

12. Вероятность выхода людей из здания, находящихся в рассматриваемом помещении $P_{Д.В_i}$, через аварийные выходы принимаем согласно п. 3.1 равной $P_{Д.В_i} = 0,03$.

13. По формуле (3.3) определяем вероятность эвакуации людей, находящихся в рассматриваемом помещении:

$$P_{\text{Э}ij} = 1 - (1 - P_{\text{Э.П}ij})(1 - P_{\text{Д.В}ij}) = 0,999$$

14. Вероятность эффективной работы технических средств по обеспечению пожарной безопасности рассматриваемого помещения (при их отсутствии в помещении) принимаем равным нулю, т.е. $D_{ij} = 0$ (п.3.1).

15. Условная вероятность поражения человека в рассматриваемом помещении при реализации данного сценария пожара согласно формуле (3.2) составляет:

$$Q_{dij} = (1 - P_{\text{Э}ij})(1 - D_{ij}) = 0,001$$

16. Потенциальный пожарный риск в рассматриваемом помещении от данного сценария пожара в соответствии с формулой (3.1) составит:

$$P_i = \sum_{j=1}^J Q_j Q_{dij} = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,001 = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

11. ВЫБОР ЗАДАНИЯ И ВАРИАНТА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Самостоятельная работа студента заключается в решении нижеприведенных задач. При этом необходимо ознакомиться с теоретическим материалом, приведенным выше.

Каждая задача должна содержать условие, решение и вывод по результатам решения. Все задачи должны соответствовать заданному варианту. Решение задач необходимо сопровождать расшифровкой расчетных формул (пояснением величин, входящих в формулу, их размерностей в системе СИ).

Расчетные формулы, справочные данные, используемые при решении задач, приводятся со ссылкой на литературные источники.

Контрольная работа оформляется в тетрадях или сшитых листах формата А4. Текст контрольной работы должен быть оформлен аккуратно черным или синим цветом, чернильной или другой пишчей ручкой. Допускается печатный текст контрольной работы.

При выполнении контрольной работы студент может использовать учебно-методическую, нормативную и научно-техническую литературу, указанную в списке литературы данных методических указаний или другую научно-техническую и справочную литературу.

Номер контрольного задания для студентов заочной формы обучения выбирается по предпоследней цифре номера зачетной книжки. Соответствующие ему номера задач для решения указаны в табл. 11.1.

Таблица 11.1

Номер задания	Номера задач	Номер задания	Номера задач
1	1, 3, 5, 7	6	2, 4, 6, 8
2	2, 4, 6, 8	7	1, 3, 5, 9
3	1, 5, 8, 10	8	2, 7, 9, 10
4	2, 3, 7, 9	9	3, 5, 8, 9
5	1, 4, 6, 10	0	4, 6, 7, 10

Номер варианта каждой из задач выбирается в соответствии с последней цифрой номера зачетной книжки из таблицы к условию соответствующей задачи.

Пример. Номер зачетной книжки 02817. По последней цифре зачетной книжки выбираем номера задания: задание 1. По табл. 11.1 находим, что в задании 1 (предпоследняя цифра зачетной книжки) следует решить задачи 1, 3, 5, 7. Для данных задач выбираем вариант, соответствующий последней цифре зачетной книжки (т.е вариант 7). Работы, выполненные не в соответствии с данными указаниями, к проверке не принимаются.

Задача № 1. Определить условную вероятность поражения человека волной давления при разгерметизации сферической емкости, содержащей СУГ. Принимается, что в течение времени, необходимого для выхода сжиженного газа из емкости, он весь испаряется. Объем резервуара V , степень его заполнения ε , вид СУГ, температура окружающей среды t^0C и расстояние нахождения человека от центра пролива СУГ принять по табл. 11.2 Плотность углеводородов в жидком состоянии приведена в Приложении Д.

Задача № 2. Определить условную вероятность поражения человека тепловым излучением «огненного шара» при разрыве сферической емкости с СУГ. Объем резервуара V , степень его заполнения ε , вид СУГ, расстояние L , м человека от центра огненного шара, температуру окружающего воздуха принять по табл. 11.3. Плотность углеводородов в жидком состоянии приведена в Приложении Д.

Задача № 3.

Определить частоту реализации пожароопасной ситуации при разгерметизации резервуара типа РВС с купольной крышей без понтона для хранения ЛВЖ. Защита резервуара от нагрева, деформации и разрушения во время пожара осуществляется при помощи автоматических стационарных установок водяного орошения, в качестве которых применяются кольца орошения.

Контроль за работоспособностью установки осуществляется независимой организацией. Диаметр отверстия истечения d , мм; коэффициент истечения μ . Истечение происходит са-

мотеком. Повторяемость ветра со скоростью не более 1 м/с (повторяемость штиля) n , % (табл. 11.4). Разгерметизация резервуара произошла в нижней части резервуара. Резервуар оборудован дыхательными клапанами. Максимально возможная температура в районе размещения объекта $t^{\circ}C$.

Для ЛВЖ с температурой вспышки менее $28^{\circ}C$ следует использовать условные вероятности воспламенения как для двухфазной среды.

Таблица 11.2

№ задачи	1	2	3	4	5
СУГ	Этан	Пропан	Пропен	Изобутан	Изопентан
$V, м^3$	100	200	300	400	500
ε	0,85	0,80	0,75	0,70	0,90
$t, ^{\circ}C$	0	15	20	25	30
$L, м$	150	100	150	200	300
№ задачи	6	7	8	9	10
СУГ	Циклогексан	Бензол	Толуол	Метилциклогексан	Циклопентан
$V, м^3$	150	100	200	300	250
ε	0,80	0,75	0,85	0,75	0,90
$t, ^{\circ}C$	20	35	30	25	15
$L, м$	180	170	120	160	200

Таблица 11.3

№ задачи	1	2	3	4	5
СУГ	Этан	Пропан	Пропен	Изобутан	Изопентан
$V, \text{м}^3$	50	75	100	150	200
ε	0,85	0,80	0,75	0,70	0,90
$L, \text{м}$	40	65	80	70	100
$t, ^\circ\text{C}$	20	25	10	20	25
№ задачи	6	7	8	9	10
СУГ	Циклогексан	Бензол	Толуол	Метилциклогексан	Циклопентан
$V, \text{м}^3$	150	200	100	300	250
ε	0,80	0,75	0,85	0,75	0,90
$L, \text{м}$	70	90	100	120	100
$t, ^\circ\text{C}$	10	30	15	20	25

Таблица 11.4

№ задачи	1	2	3	4	5
ЛВЖ	Бензол	Ацетон	Гексан	Бензин АИ-93	Бутилбензол
$d, \text{мм}$	25	100	25	100	25
μ	0,80	0,85	0,8	0,85	0,90
$n, \%$	12	10	15	12	20
$\text{PBC}, \text{м}^3$	1000	800	900	2000	3000

Окончание табл. 11.4

$t, ^\circ C$	35	37	40	30	35
№ задачи	6	7	8	9	10
ЛВЖ	Декан	Гептан	Изопрен	Кумол	Диэтиламин
$d, \text{мм}$	100	25	100	25	100
μ	0,85	0,80	0,90	0,80	0,85
n, %	12	15	10	18	20
PBC, м ³	600	1000	900	2000	3000
$t, ^\circ C$	30	35	37	40	45

Задача № 4.

Определить индивидуальный риск работника предприятия, занятого осмотром наружных установок по хранению ЛВЖ. Организационно-распорядительные документы предписывают время проведения этой процедуры – один час в рабочий день. Количество рабочих дней в году – N. ЛВЖ хранится в PBC объемом $V, \text{м}^3$. Степень заполнения ε , давление в аппарате близкое к атмосферному ($P = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$), коэффициент разлития f_p , температура окружающей среды t_p приведены в табл.11.5. Площадка не имеет ограждения.

Таблица 11.5

№ задачи	1	2	3	4	5
ЛВЖ	Бензол	Ацетон	Метиловый спирт	Октан	Пропанол

Продолжение табл. 11.5

$V, \text{ м}^3$	1000	800	500	300	700
ε	0,75	0,90	0,80	0,85	0,70
$T_p, ^\circ\text{C}$	10	20	15	25	15
$f_p, \text{ м}^{-1}$	5	20	20	150	5
N, дней	250	220	240	200	270
№ задачи	6	7	8	9	10
ЛВЖ	Гептан	Декан	Гексан	Н-бутиловый спирт	Этил-ацетат
$V, \text{ м}^3$	500	600	300	1000	400
ε	0,80	0,90	0,70	0,85	0,75
$t_p, ^\circ\text{C}$	15	20	10	15	10
$f_p, \text{ м}^{-1}$	20	5	150	5	150
N, дней	200	230	240	270	300

Задача № 5

Определить потенциальный пожарный риск $P(a)$ на расстоянии 30 м от наружной установки с открытой площадкой для автоцистерны (АЦ), используемой для заполнения подземных резервуаров светлыми нефтепродуктами. Объем светлых нефтепродуктов в АЦ – $V_{\text{ж}}$. Площадка не имеет ограждения. Физико-химические и пожаровзрывоопасные свойства нефтепродуктов, максимальная температура воздуха в районе расположения наружной установки t_p , коэффициент разлития f_p приведены в табл. 11.6.

Таблица 11.6

№ задачи	1	2	3	4	5
Нефте-продукт	Бензин АИ-92 «Л»	Бензин АИ-93 (Л)	Бензин АИ-95	Бензин Б-70 (авиационный)	Дизельное топливо ДС-3
$V, \text{ м}^3$	8	6	8	6	8
Молярная масса, кг/кмоль	97,0	98,2	95,3	102,2	172,3
Теплота сгорания, кДж/кг	43538	43641	43641	44094	43590
$T_{\text{всп}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Минус 35	Минус 36	Минус 36	Минус 34	> + 35
$S_{\text{НКПР}}, \%$ (об)	0,93	1,06	0,96	0,79	0,61
$f_p, \text{ м}^{-1}$	20	150	20	150	150
$t_p, \text{ }^\circ\text{C}$	20	25	20	30	38
№ задачи	6	7	8	9	10
Нефте-продукт	Бензин А-72 (зимний)	Бензин АИ-93 «З»	Гептил	Бензин (авиационный)	Бензин экстракционный
$V, \text{ м}^3$	8	10	6	10	8
Молярная масса, кг/кмоль	97,2	95,3	60,0	102,2	172,3
Теплота сгорания, кДж/кг	44239	43641	44000	42737	43000
$T_{\text{всп}}, \text{ }^\circ\text{C}$	Минус 36	Минус 37	Минус 37	Минус 34	Минус 28
$S_{\text{НКПР}}, \%$ (об)	1,08	1,10	1,10	0,32	1,10
$f_p, \text{ м}^{-1}$	150	20	150	20	150
$T_p, \text{ }^\circ\text{C}$	25	30	20	35	30

Задача № 6

Определить потенциальный пожарный риск поражения человека высокотемпературными продуктами сгорания паровоздушного облака, находящегося на расстоянии r , м от обвалования, при полном разрушении РВС объемом V , м³ для хранения ЛВЖ. Степень заполнения резервуара ε . Поверхность внутри обвалования имеет спланированное грунтовое покрытие. Перелив ЛВЖ через обвалование не происходит. Высоту обвалования и диаметр РВС принять согласно СНиП2.11.03-93 «Склады нефти и нефтепродуктов. Противопожарные нормы». Температура окружающей среды t_{δ} , °С. Значения показателей пожарной опасности веществ, необходимые для расчета, приведены в Приложении Ж, а исходные данные в табл. 11.7.

Таблица 11.7

№ задачи	1	2	3	4	5
ЛВЖ	Бензин АИ-72 «3»	Бензин АИ-93 (Л)	Бензин АИ-93 «3»	Бензин Б-70 (авиационный)	Амилен
V , м ³	200	300	400	700	200
ε , %	95	90	85	90	85
T_p , °С	20	25	30	25	20
r , м	6	8	7	10	5
№ задачи	6	7	8	9	10
ЛВЖ	Ацетон	Толуол	Бензол	н-гексан	н-октан
V , м ³	2000	1000	3000	700	1000
ε , %	95	90	85	90	85
T_p , °С	20	25	30	25	20
r , м	10	12	15	8	10

Задача № 7

В результате аварии на автодороге третьей категории, проходящей по открытой местности, произошел разрыв автоцистерны объемом V , м³ с СУГ. Степень заполнения автоцистерны ε . Для оценки максимально возможных последствий принять, что в результате выброса газа в пределах воспламенения оказалось практически все топливо, перевозившееся в цистерне. Воспламенение облака привело к возникновению взрывного его превращения. Требуется определить среднее число погибших людей в результате воздействия опасных факторов взрыва на расстоянии L , м от места аварии, где расположены n дачных участков со средним нахождением трех человек на участке. Температура окружающей среды 25 °С. Исходные данные приведены в табл. 11.8.

Таблица 11.8

№ задачи	1	2	3	4	5
СУГ	Этан	Пропан	Пропен	Изобутан	Изопентан
V , м ³	8	6	7	9	10
ε , %	90	85	80	95	90
L , м	60	50	70	80	90
N , участков	50	50	60	80	100
№ задачи	6	7	8	9	10
СУГ	Циклогексан	Бензол	Толуол	Метилциклогексан	Циклопентан
V , м ³	6	8	10	9	7
ε , %	85	95	90	80	85
L , м	50	60	90	80	50
N , участков	50	70	100	80	60

Задача № 8

Определить индивидуальный пожарный риск в зданиях и на территории производственного объекта, представляющих собой совокупность следующих участков:

- участок А – здание с помещениями А1, А2 и А3;
- участок В – открытая площадка;
- участок С – открытая площадка.

Персонал разделен согласно штатного расписания на три условные категории: 1, 2 и 3. Продолжительность рабочей недели для данных категорий работников составляет 40 часов в неделю; продолжительность отпуска – 28 календарных дней.

Студенты, у которых последняя цифра зачетной книжки оканчивается на 0, 1, 2 определяют индивидуальный пожарный риск для первой категории работников; на 3, 4, 5 – для второй категории работников; на 6, 7, 8, 9 – для третьей категории работников. Необходимые данные для расчетов приведены в табл. 11.9, 11.10, 11.11.

Таблица 11.9

Значения потенциального пожарного риска на территории объекта

Наименование участка территории объекта	Потенциальный пожарный риск в пределах участка $P_{(i)}$, год ⁻¹
А	$1,5 \cdot 10^{-7}$
В	$2,7 \cdot 10^{-6}$
С	$2,0 \cdot 10^{-5}$

Примечание: для участка А приведено значение потенциального пожарного риска, обусловленного опасностью пожаров вне пределов этого здания

Таблица 11.10

Значения потенциального пожарного риска в здании (участок А), обусловленного опасностью пожаров в нем

Наименование участка территории объекта	Потенциальный пожарный риск в пределах участка $P_{(i)}, \text{год}^{-1}$
A1	$3,4 \cdot 10^{-6}$
A2	$6,2 \cdot 10^{-4}$
A3	$1,6 \cdot 10^{-6}$

Таблица 11.11

Вероятность присутствия персонала на различных участках объекта

Наименование участка территории объекта	Вероятность присутствия на участке объекта		
	Работники 1-ой категории	Работники 2-ой категории	Работники 3-ей категории
A	0,14	0,07	0,07
A1	0,07	0,02	0,02
A2	0,05	0,02	0,02
A3	0,02	0,03	0,03
B	0,05	0,04	0,11
C	0,03	0,11	0,04

Задача № 9

Определить условную вероятность поражения человека при горении твердых или жидких горючих веществ и материалов, находящихся на открытой площадке для их складирования. Площадь хранения (разлива) F , м^2 . Абсолютная максимальная температура воздуха в районе размещения пожарной нагрузки составляет t_p , $^{\circ}\text{C}$. При расчете интенсивности теплового излучения при горении твердых или жидких горючих веществ и материалов принять, что их горение происходит на площади их размещения (разлива). Расстояние человека от места расположения горючих веществ и материалов L , м. Удельная массовая

скорость выгорания веществ и материалов M , $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$. Исходные данные приведены в табл. 11.12.

Таблица 11.12

№ задачи	1	2	3	4	5
Вид материала, вещества	Пиломатериал (штабель)	Пластик (поддоны)	Резина	Карболиновые изделия	Органическое стекло
F , м^2	1000	200	500	400	600
t_p , $^{\circ}\text{C}$	34	33	30	40	37
L , м	40	35	25	30	25
M_2 , $\text{кг/м}^2 \cdot \text{C}$	0,04	0,04	0,011	0,01	0,016
№ задачи	6	7	8	9	10
Вид материала, вещества	Масло промышленное И-5А	Масло трансформаторное	Дизельное топливо	Пиломатериал (штабель)	Хвойные стройматериалы (штабель)
F , м^2	1080	200	900	800	600
t_p , $^{\circ}\text{C}$	37	40	38	30	25
L , м	30	25	30	25	30
M_2 , $\text{кг/м}^2 \cdot \text{C}$	0,44	0,04	0,014	0,04	0,04

Задача № 10

Определить потенциальный пожарный риск поражения людей, попавших в зону действия ударной волны при взрыве резервуара хранения СУГ (ЛВЖ) под давлением на расстоянии L , (м) от него. Резервуар с СУГ (ЛВЖ) объемом V , (м^3) оснащен предохранительным клапаном с давлением срабатывания P , (МПа). Нормальная температура кипения СУГ (ЛВЖ) $t_{\text{кип}}$, ($^{\circ}\text{C}$). Степень заполнения резервуара ε , при температуре окружающей среды t_{oc} , ($^{\circ}\text{C}$). Плотность СУГ (ЛВЖ) при данной температуре ρ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$. Исходные данные приведены в табл. 11.13.

Таблица 11.13

№ задачи	1	2	3	4	5
СУГ	Метан	Пропан	Пропилен	Изобутан	Этилбензол
V , м^3	400	600	500	400	400
ε , %	0,90	0,80	0,85	0,90	0,90
L , м	90	100	70	100	80
$t_{\text{кип}}$, $^{\circ}\text{C}$	минус 161	минус 42,1	минус 47,7	минус 11,73	136,2
t_{oc} , $^{\circ}\text{C}$	20	25	15	25	25
ρ , $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	342,1	493,4	585,0	551,1	862,6
P , МПа	8,40	2,16	2,33	1,46	1,8
Константы Антуана					
A	5,68923	5,95547	5,94852	5,95318	6,35879
B	380,224	813,864	786,532	916,054	1590,660

C_A	264,804	248,116	247,243	243,783	229,581
№ задачи	6	7	8	9	10
СУГ	Этилен	Н-бутан	Н-пентан	Толуол	Бутилен
$V, \text{ м}^3$	500	300	400	300	400
$\varepsilon, \%$	0,80	0,85	0,80	0,85	0,90
$L, \text{ м}$	70	125	150	100	90
$t_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	минус 104	минус 0,5	36,1	110,6	минус 6,9
$t_{\text{ос}}, ^\circ\text{C}$	10	20	20	25	20
$\rho, \text{ кг} \cdot \text{ м}^{-3}$	568,0	578,9	626,2	862,3	621,0
$P, \text{ МПа}$	4,700	1,370	0,872	0,653	1,490
Константы Антуана					
A	7,2058*	6,0052	6,87372*	6,0507	6,84290*
B	768,26*	968,098	1075,82*	1328,171	926,10*
C_A	282,43*	242,555	233,36*	217,713	240,0*
Примечания:					
1. Единицы измерения констант Антуана, отмеченные звездочкой – мм рт.ст., остальных – КПа.					
2. Соотношения между различными единицами давления приведены в Приложении И.					

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назовите законодательные и нормативные правовые акты, регламентирующие процедуру оценки пожарного риска, и в чем они заключаются?
2. Для каких целей используются результаты оценки пожарного риска?
3. Какие нормативные значения пожарного риска установлены ФЗ № 123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» для производственных объектов.
4. Сущность и основные положения методики анализа пожарной опасности технологических процессов.
5. Приведите основные термины и понятия пожарной безопасности технологических процессов, установленные нормативно-правовыми актами и нормативными документами?
6. Назовите источники информации о размещении горючих веществ и материалов на производстве?
7. Какие события пожарной опасности характерны для периода нормальной работы технологической системы?
8. Сформулируйте понятие «источник зажигания» и укажите основные признаки классификации источников зажигания.
9. Перечислите наиболее вероятные события, которые могут являться причинами пожароопасных ситуаций на объектах защиты?
10. Какая информация о частотах реализации пожароопасных ситуаций на объектах защиты используется при оценке пожарного риска?
11. Что представляет собой логическое дерево событий, с какой целью его строят и какие процессы необходимо при этом рассматривать?
12. Какие физические явления учитываются при построении полей ОФП при различных сценариях его развития?
13. Какими критериями оцениваются последствия воздействия ОФП на людей, оборудование и что они показывают?
14. В каком нормативном документе изложен порядок определения пожарного риска на производственных объектах?
15. Запишите выражение для определения величины потенциального пожарного риска в определенной точке территории производственного объекта и поясните его?

16. Запишите выражение для определения величины потенциального пожарного риска в i -м помещении здания объекта защиты и поясните его?
17. Какие виды моделей применяются для описания термогазодинамических параметров пожара и в чем их сущность?
18. Как определяется вероятность присутствия работника в помещении (здании) или на территории объекта? Какие сведения при этом необходимы?
19. Запишите выражение пробит-функции в общем виде и поясните его?
20. На каком расстоянии от наружной установки следует определять величину пожарного риска и чему он должен быть равен?
21. Какие факторы пожара относятся к опасным факторам, воздействующих на людей и имущество?
22. Запишите пробит-функцию для тяжелых разрушений здания или летального поражения людей и поясните ее?
23. Запишите пробит-функцию для полного разрушения здания и поясните ее?
24. Запишите пробит-функцию для поражения человека тепловым излучением и поясните ее?
25. Назовите основные структурные элементы алгоритма расчета параметров волны давления при сгорании газопаровоздушных смесей в открытом пространстве?
26. Как определяется площадь разлива и интенсивность испарения жидкости при расчетном обосновании аварии аппарата?
27. Способы ограничения аварийного растекания пожароопасных жидкостей, требования к устройству защитных ограждений в резервуарных парках.
28. Определение массы горючих газов и паров, поступивших в окружающее пространство, при разгерметизации наружных установок.
29. Сущность методики определения расчетного избыточного давления взрыва горючей смеси в окружающем пространстве.
30. Образование зон ВОК на наружных технологических установках при разгерметизации технологического оборудования, условия образования зон ВОК и оценка их размеров.

Приложение А (информационное)

Перечень пожароопасных ситуаций и пожаров и сценариев их развития для одиночного РВС с купольной крышей без понтона

Наименование пожароопасной ситуации пожара	Сценарий развития пожароопасной ситуации пожара	Номер сценария
Разгерметизация резервуара, характеризующаяся диаметром отверстия истечения 25 мм	Пожар пролива бензина в обваловании (ограждении) парка без возникновения вторичных пожаров	1
	Пожар пролива бензина в обваловании (ограждении) парка с возникновением вторичного пожара резервуара № 1 по всей поверхности	2
	Взрыв паровоздушного облака	3
	Сгорание паровоздушного облака в режиме пожара-вспышки	4
Разгерметизация резервуара, характеризующаяся диаметром отверстия истечения 100 мм	Пожар пролива бензина в обваловании (ограждении) парка без возникновения вторичных пожаров	5
	Пожар пролива бензина в обваловании (ограждении) парка с возникновением вторичного пожара резервуара № 1 по всей поверхности	6
	Взрыв паровоздушного облака	7
	Сгорание паровоздушного облака в режиме пожара-вспышки	8
Разгерметизация резервуара, характеризующаяся полным разрушением	Пожар пролива бензина в обваловании (ограждении) парка и пролива переливающегося через обвалованное (ограждение) бензина без возникновения вторичных пожаров	9
	Взрыв паровоздушного облака	10
	Сгорание паровоздушного облака в режиме пожара-вспышки	11
Возникновение пожара резервуара по всей поверхности	Пожар резервуара по всей поверхности без возникновения вторичных пожаров	12
Возникновение пожара на дыхательной арматуре	Пожар резервуара по всей поверхности без возникновения вторичных пожаров	13

Приложение Б (справочное)

Таблица 1

*Частоты разгерметизации для технологического оборудования
производственных объектов [3]*

Наименование оборудования	Иницирующее аварийю событие	Диаметр отверстия истечения, мм	Частота разгерметизации, год ⁻¹
Резервуары, емкости, сосуды и аппараты под давлением	Разгерметизация с последующим истечением жидкости, газа или двухфазной среды	5	$4,0 \cdot 10^{-5}$
		12,5	$1,0 \cdot 10^{-5}$
		25	$6,2 \cdot 10^{-6}$
		50	$3,8 \cdot 10^{-6}$
		100	$1,7 \cdot 10^{-6}$
		Полное разрушение	$3,0 \cdot 10^{-7}$
Насосы (центробежные)	Разгерметизация с последующим истечением жидкости или двухфазной среды	5	$4,3 \cdot 10^{-3}$
		12,5	$6,1 \cdot 10^{-4}$
		25	$5,1 \cdot 10^{-4}$
		50	$2,0 \cdot 10^{-4}$
		Диаметр подводящего/отводящего трубопровода	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Компрессоры (центробежные)	Разгерметизация с последующим истечением газа	5	$1,1 \cdot 10^{-2}$
		12,5	$1,3 \cdot 10^{-3}$
		25	$3,9 \cdot 10^{-4}$
		50	$1,3 \cdot 10^{-4}$
		Полное разрушение	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Резервуары для хранения ЛВЖ и ГЖ при давлении, близком к атмосферному (при единичном объеме 450 м ³ и более)	Разгерметизация с последующим истечением жидкости в обвалование	25	$8,8 \cdot 10^{-5}$
		100	$1,2 \cdot 10^{-5}$
		Полное разрушение	$5,0 \cdot 10^{-6}$

Продолжение табл. 1

Наименование оборудования	Иницирующее аварийю событие	Диаметр отверстия истечения, мм	Частота разгерметизации, год ⁻¹
Резервуары для хранения ЛВЖ и ГЖ при давлении, близком к атмосферному (при единичном объеме менее 450 м ³)	Разгерметизация с последующим истечением жидкости в обвалование	25	$5,0 \cdot 10^{-4}$
		100	$5,0 \cdot 10^{-5}$
		Полное разрушение	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Химические реакторы	Разгерметизация с последующим истечением жидкости или двухфазной среды	5	$4,0 \cdot 10^{-5}$
		12,5	$1,0 \cdot 10^{-5}$
		25	$6,2 \cdot 10^{-6}$
		50	$3,8 \cdot 10^{-6}$
		Полное разрушение	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Одностенные изо-термические резервуары для хранения сжиженных газов	Разгерметизация с последующим истечением жидкости в обвалование	Утечка паров	$2,0 \cdot 10^{-4}$
		150	$1,0 \cdot 10^{-4}$
		500	$8,0 \cdot 10^{-5}$
		Полное разрушение	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Резервуары с плавающей крышей (для хранения ЛВЖ и ГЖ)	Пожар в кольцевом зазоре по периметру резервуара	–	$4,6 \cdot 10^{-3}$
	Пожар по всей поверхности резервуара	–	$9,3 \cdot 10^{-4}$
Резервуары со стационарной крышей (для хранения ЛВЖ и ГЖ)	Пожар на дыхательной арматуре	–	$9,0 \cdot 10^{-5}$
	Пожар по всей поверхности резервуара	–	$9,0 \cdot 10^{-5}$

Наименование оборудования	Иницирующее аварийю событие	Диаметр отверстия истечения, мм	Частота разгерметизации, год ⁻¹
Компрессоры (центробежные)	Разгерметизация с последующим истечением газа	5	$1,1 \cdot 10^{-2}$
		12,5	$1,3 \cdot 10^{-3}$
		25	$3,9 \cdot 10^{-4}$
		50	$1,3 \cdot 10^{-4}$
		Полное разрушение	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Гибкие соединения для проведения сливно-наливных операций	Разгерметизация с последующим истечением жидкости, газа или двухфазной среды	5	$1,3 \cdot 10^{-5}$
		15	$1,0 \cdot 10^{-6}$
		Полное разрушение	$4,0 \cdot 10^{-5}$
<p>Примечания:</p> <p>1. Здесь и далее под полным разрушением подразумевается утечка с диаметром истечения, соответствующим максимальному диаметру подводящего или отводящего трубопровода, или разрушения резервуара, емкости, сосуда или аппарата.</p> <p>2. При определении частоты разгерметизации фильтров и кожухотрубных теплообменников указанное оборудование допускается рассматривать как аппараты под давлением.</p> <p>3. Аппараты воздушного охлаждения допускается рассматривать как участки технологических трубопроводов, длина которых соответствует суммарной длине труб в пучках теплообменника.</p> <p>4. Частоту реализации сценариев, связанных с образованием огненного шара на емкостном оборудовании с сжиженными газами и легковоспламеняющимися жидкостями вследствие внешнего воздействия очага пожара, следует определять на основе анализа логических деревьев событий. При отсутствии необходимых данных допускается принимать частоту внешнего воздействия, приводящего к реализации огненного шара, равной $2,5 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹ на один аппарат (резервуар).</p> <p>5. Для гибких соединений при проведении сливно-наливных операций в таблице приведена вероятность разгерметизации (разрушения) на одну сливно-наливную операцию.</p>			

Таблица 2

Частоты утечек из технологических трубопроводов [3]

Диаметр трубопровода, мм	Частота утечек, (м ⁻¹ ·год ⁻¹)				
	Малая (диаметр отверстия 12,5 мм)	Средняя (диаметр отверстия 25 мм)	Большая (диаметр отверстия 50 мм)	Большая (диаметр отверстия 100 мм)	Разрыв
50	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$	–	–	$1,4 \cdot 10^{-6}$
100	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-7}$	–	$2,4 \cdot 10^{-7}$
150	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$7,9 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-8}$
250	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$7,8 \cdot 10^{-8}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$
600	$4,7 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$7,9 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-8}$	$6,4 \cdot 10^{-9}$
900	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-9}$
1200	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$3,2 \cdot 10^{-9}$

Таблица 3

Частоты возникновения пожара для некоторых зданий производственных объектов [3]

Объект	Частота возникновения пожара, (м ² ·год ⁻¹)
Электростанции	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Склады химической продукции	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Склады многономенклатурной продукции	$9,0 \cdot 10^{-5}$
Инструментально-механические цеха	$0,6 \cdot 10^{-5}$
Цеха по обработке синтетического каучука и искусственных волокон	$2,7 \cdot 10^{-5}$
Литейные и плавильные цеха	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Цеха по переработке мясных и рыбных продуктов	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Цеха горячей прокатки металлов	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Текстильные производства	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Административные здания производственных объектов	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Приложение В (справочное)

Таблица 1

*Условная вероятность мгновенного воспламенения
и воспламенения с задержкой [3]*

Массовый расход истечения, кг/с		Вероятность мгновенного воспламенения			Вероятность последующего воспламенения при отсутствии мгновенного воспламенения			Вероятность сгорания с образованием избыточного давления при последующем воспламенении		
Малый (< 1)	0,5	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,080	0,080	0,050
Средний (1–50)	10	0,035	0,035	0,015	0,036	0,036	0,015	0,240	0,240	0,050
Большой (>50)	100	0,150	0,150	0,040	0,176	0,176	0,042	0,600	0,600	0,050
Полный разрыв	Не определено	0,200	0,200	0,050	0,240	0,240	0,061	0,540	0,540	0,100
Примечание. Под задержкой воспламенения следует понимать время, большее одной минуты.										

Таблица 2

Условная вероятность воспламенения при различных диаметрах отверстия истечения [15]

Диаметр истечения, мм	Условная вероятность воспламенения	
	газ/двухфазная среда	жидкость
5	0,1	0,04
25	0,2	0,08
50	0,3	0,12
Разрыв	0,5	0,2

Для ЛВЖ с температурой вспышки менее 28 °С следует использовать условные вероятности воспламенения как для двухфазной среды.

Таблица 3

Условные вероятности мгновенного воспламенения и воспламенения с задержкой при различных диаметрах отверстия истечения [15]

Диаметр истечения, мм	Мгновенное воспламенение	Воспламенение с задержкой
5	0,1	0,9
25	0,2	0,8
50	0,3	0,7
Разрыв	0,4	0,6

Таблица 4

Условная вероятность срабатывания систем противопожарной защиты [13]

Система противопожарной защиты	Условная вероятность эффективного срабатывания
Системы противопожарной защиты при соблюдении в полном объеме требований нормативных документов по пожарной безопасности при проектировании, монтаже и эксплуатации:	
– автоматические установки пожарной сигнализации;	0,8
– автоматические установки пожаротушения или водяного орошения при наличии контроля за работоспособностью установки независимой организацией (вне зависимости от типа установки пожаротушения);	0,95
–	

Окончание табл. 4

Система противопожарной защиты	Условная вероятность эффективного срабатывания
<ul style="list-style-type: none"> – автоматические установки водяного (пенного) пожаротушения или водяного орошения при отсутствии контроля за работоспособностью установки независимой организацией; – остальные типы автоматических установок пожаротушения при отсутствии контроля за работоспособностью установки независимой организацией; – 	<p style="text-align: center;">0,6</p> <p style="text-align: center;">0,5</p>
Системы противопожарной защиты при несоблюдении в полном объеме требований нормативных документов по пожарной безопасности при проектировании, монтаже и эксплуатации (при отсутствии данных предприятия-поставщика)	<p style="text-align: center;">0</p>

Приложение Г (справочное)

Таблица 1

Критические температуры, вызывающие потерю несущей способности строительных материалов [15]

Материал	Критическая температура, °С
Сталь марки Ст3 и Ст5 в стальных конструкциях. Арматурные стали классов А-I, А-II, А-IV, Am-IV, А-V, Am-V	500
Арматурная сталь класса А-III	600
Арматурная сталь классов Am-VI, Am-VII, В-I, Вр-I	450
Высокопрочная арматурная проволока классов В-II, Вр-II и арматурные канаты класса К-7	400
Сталь марки Ст3 и Ст5 при жестком закреплении стальных конструкций и для металлических каркасов	300
Конструкции из алюминиевых сплавов	250
Гранит	700
Известняк	800
Тяжелый бетон с заполнителем	600
Тяжелый бетон с известняковым заполнителем	675
Кирпич глиняный обыкновенный	900
Силикатный кирпич	700

Таблица 2

*Предельно допустимая интенсивность теплового излучения
пожаров проливов ЛВЖ и ГЖ [5]*

Степень поражения	Интенсивность излучения, кВт/м ²
Без негативных последствий в течение длительного времени	1,4
Безопасно для человека в брезентовой одежде	4,2
Непереносимая боль через 20–30 с ожог 1-й степени через 15–20 с ожог 2-й степени через 30–40 с	7,0
Непереносимая боль через 3–5 с ожог 1-й степени через 6–8 с ожог 2-й степени через 12–16 с	10,5
Мгновенные болевые ощущения через 4 с	20
Летальный исход с вероятностью 50 % при длительном воздействии около 10 с	44,5

Таблица 3

*Предельно допустимая доза теплового излучения
при воздействии «огненного шара» на человека [5]*

Степень поражения	Доза теплового излучения, Дж/м ²
Ожог 1-й степени	$1,2 \cdot 10^5$
Ожог 2-й степени	$2,2 \cdot 10^5$
Ожог 3-й степени	$3,2 \cdot 10^5$

Таблица 4

Критические параметры интенсивности теплового излучения, вызывающие воспламенение горючих материалов [3]

Материалы	q_{CR} , кВт/м ²
Древесина (сосна влажностью 12 %)	13,9
Древесно-стружечные плиты (плотностью 417 кг/м ³)	8,3
Торф брикетный	13,2
Торф кусковой	9,8
Хлопок-волокно	7,5
Слоистый пластик	15,4
Стеклопластик	15,3
Пергамин	17,4
Резина	14,8
Уголь	35,0
Рулонная кровля	17,4
Картон серый	10,8
Декоративный бумажно-слоистый пластик	19,0–24,0
Металлопласт	24,0–27,0
Плита древесно-волокнистая	13,0
Плита древесно-стружечная	12,0
Плита древесно-стружечная с отделкой «Полипен»	12,0
Плита древесно-волокнистая с лакокрасочным покрытием под ценные породы дерева	12,0–16,0
Кожа искусственная	17,9–20,0
Стеклопластик на полиэфирной основе	14,0
Лакокрасочные покрытия	25,0
Обои моющиеся ПВХ на бумажной основе	12,0
Линолеум ПВХ	10,0–12,0
Линолеум алкидный	10,0
Линолеум ПВХ на тканевой основе	6,0–12,0
Покрытие ковровое	4,0–6,0
Сено, солома (при минимальной влажности до 8 %)	7,0
Легковоспламеняющиеся, горючие и трудногорючие жидкости при температуре самовоспламенения, °С:	
300	12,1
350	15,5
400	19,9
500 и выше	28,0 и выше

Таблица 5

Эффект воздействия ударной волны на слуховой аппарат человека [15]

Эффект	Избыточное давление, кПа
Граница временной потери слуха	2,0
Нижний порог разрыва барабанной перепонки	34,5
50 %-ная вероятность разрыва барабанной перепонки	103
100 %-ная вероятность разрыва барабанной перепонки	400

Таблица 6

*Виды воздействия избыточного давления на людей,
находящихся в зданиях [15]*

Вид воздействия	Давление воздействия, кПа
Люди, находящиеся в неукрепленных зданиях, погибнут в результате прямого поражения ударной волны под развалинами зданий или вследствие удара о твердые предметы	190
Наиболее вероятно, что все люди, находящиеся в неукрепленных зданиях, либо погибнут, либо получат серьезные повреждения в результате действия взрывной волны, либо при обрушении здания или перемещении тела взрывной волной	69–76
Люди, находящиеся в неукрепленных зданиях, либо погибнут или получат серьезные повреждения барабанных перепонки и легких под воздействием взрывной волны, либо будут поражены осколками и развалинами здания	55
Обслуживающий персонал получит серьезные повреждения с возможным летальным исходом в результате поражения осколками, развалинами здания, горящими предметами и т. п. Имеется 10 %-ная вероятность разрыва барабанных перепонки	24
Возможны временная потеря слуха или травма в результате вторичных эффектов взрывной волны, таких как обрушение зданий, и третичного эффекта переноса тела. Летальный исход или серьезные повреждения от прямого воздействия взрывной волны маловероятны	16
С высокой надежностью гарантируется отсутствие летального исхода или серьезных повреждений. Возможны травмы, связанные с разрушением стекол и повреждением стен здания	5,9–8,3

Таблица 7

*Предельно допустимое избыточное давление при сгорании
газо- паро- или пылевоздушных смесей в помещениях
или на открытом пространстве [5]*

Степень поражения	Избыточное давление, кПа
Полное разрушение	100
50 %-ное разрушение	53
Средние повреждения зданий	28
Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т. п.)	12
Нижний порог повреждения человека волной давления	5
Малые повреждения (разбита часть остекления)	3

Таблица 8

*Критическое избыточное давление для повреждения элементов
зданий ударной волной [15]*

Характер повреждений элементов зданий	Избыточное давление, кПа
Разрушение остекления	2–7
Разрушение перегородок и кровли деревянных каркасных зданий, кирпичных зданий, железобетонных каркасных зданий	12 15 17
Разрушение перекрытий деревянных каркасных зданий, промышленных кирпичных зданий, промышленных зданий со стальным и желе- зобетонным каркасом, зданий с массивными стенами	17 28 30 42
Разрушение стен шлакоблочных зданий	22
деревянных каркасных зданий, кирпичных зданий со стенами в 1,5 кирпича, зданий с массивными стенами	28 40 100
Разрушение фундамента	215–400

Таблица 9

*Характер повреждения промышленных конструкций
в зависимости от избыточного давления ударной волны [15]*

Характер повреждений промышленных конструкций	Избыточное давление, кПа
Незначительные повреждения стальных конструкций каркасов, ферм	8–10
Разрушение стальных каркасов, ферм и перемещение оснований	20
Разрушение промышленных стальных несущих конструкций	20–30
Разрушение опорных структур резервуаров	100
Перемещение цилиндрических резервуаров, повреждение трубопроводов	50–100
Повреждение ректификационных колонн	35–80
Незначительные деформации трубопроводных эстакад	20–30
Перемещение трубопроводных эстакад, повреждение трубопроводов	35–40
Разрушение трубопроводных эстакад	40–55

Приложение Д
(справочное, ГОСТ 28656-80)

Плотность углеводородов в жидком состоянии, кг/м³

Тем- ра, °С	Этан	Пропан	Пропен	Изобутан	Изопентан	Циклогексан	Бензол	Толуол	Метил- циклогексан	Цикло- пентан
0	404,8	529,7	545,7	586,0	639,2	797,3	900,0	885,5	786,8	764,8
5	391,8	522,8	538,0	575,3	634,3	792,6	894,8	880,8	782,4	760,0
10	377,5	515,8	530,6	569,4	629,4	788,0	889,6	876,2	778,1	755,1
15	361,1	508,6	522,7	563,4	624,5	783,3	884,3	871,6	773,8	750,2
20	342,1	501,1	514,8	557,3	619,6	778,6	879,0	866,9	769,4	745,4
25	319,7	493,4	506,4	551,1	614,6	773,9	873,7	862,3	765,0	740,4
30	291,9	485,5	498,1	544,8	609,7	769,2	868,4	857,6	760,6	735,6
35		477,5	489,2	538,5	604,7	764,4	863,0	853,0	756,2	730,7
40		468,9	480,4	531,8	599,7	759,6	857,6	848,3	751,8	725,8

Приложение Е
(справочное, СНиП 2.11.03-93)

Таблица 1

Номенклатура и основные параметры стальных вертикальных резервуаров со стационарной крышкой

Тип РВС	Геометрические характеристики РВС				Толщина стенки верхнего пояса, м
	высота, м	диаметр, м	площадь, м ²	периметр, м	
РВС-100	6,0	4,7	17,3	14,8	3,0
РВС-200	6,0	6,6	34,2	20,7	3,0
РВС-300	7,5	7,6	45,3	23,9	3,0
РВС-400	7,5	8,5	56,7	26,7	3,0
РВС-700	9,0	10,4	84,9	32,7	3,0
РВС-1000	9,0	12,0	120,0	39,0	4,0
РВС-2000	12,0	15,2	181,0	48,0	
РВС-3000	12,0	19,0	283,0	60,0	
РВС-5000	15,0	21,0			

Таблица 2

Горизонтальные резервуары

Номинальный объем, м ³	Основные параметры резервуаров, м		
	Диаметр	Длина при днище	
		плоском	коническом
3,0	1,4	2,0	-
5,0	1,9	2,0	-
10,0	2,2	2,8	3,3
25,0	2,8	4,3	4,8
50,0	2,8	9,0	9,6
75,0	3,2	9,0	9,7
100,0	3,2	12,0	12,7
500,0	6,0	18,0	-
1000,0	6,0	35,8	-

Приложение Ж (справочное)

Показатели пожарной опасности веществ

Вещество	Хим. формула	Молярная масса, кг·кмоль ⁻¹	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал констант Антуана, °С	НКПР, % (об.)	Теплота сгорания кДж·кг ⁻¹
			A	B	C _A			
Амилен	C ₃ H ₆ O	58,080	6,37551	1281,721	237,088	-15÷93	2,70	31360
Ацетон	C ₃ H ₆ O	70,134	5,91048	1014,294	229,783	-60÷100	1,49	45017
Бензин Б-70 (авиаци-й)	C _{7,267} H _{14,796}	102,200	4,19500	682,875	222,066	-60÷850	1,06	43641
Бензин АИ-72 «З»	C _{6,991} H _{13,108}	97,200	5,07000	682,870	222,060	-60÷90	0,93	43538
Бензин АИ-93 «Л»	C _{7,024} H _{13,706}	98,200	4,12311	664,976	221,695	-60÷95	1,06	43641
Бензин АИ-93 «З»	C _{6,911} H _{12,168}	95,300	4,25510	695,019	223,990	-60÷95	1,10	43641
Бензол	C ₆ H ₆	78,113	6,10906	1252,776	225,178	-7÷80	1,43	40576
Н-гексан	C ₆ H ₁₄	86,177	5,99517	1166,274	223,661	-54÷69	1,24	45105
Н-октан	C ₈ H ₁₈	114,230	6,09396	1379,556	211,896	-14÷126	0,90	44787
Толуол	C ₇ H ₈	92,140	6,05070	1328,171	217,713	-26,7÷110,6	1,27	40936

Приложение И (справочное)

*Соотношения между различными единицами
измерения давления*

Единица	Па	ГПа	МПа	кПа	мПа
1 Па (н/м ²)	1,00	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	10 ⁻³	10 ³
1 ГПа	10 ⁹	1	10 ³	10 ⁶	10 ¹²
1 МПа	10 ⁶	10 ⁻³	1,00	10 ³	10 ⁹
1 кПа	10 ³	10 ⁻⁶	10 ⁻³	1,00	10 ⁶
1 мПа	10 ⁻³	10 ⁻¹²	10 ⁻⁹	10 ⁻⁶	1,00
1 мкПа	10 ⁻⁶	10 ⁻¹⁵	10 ⁻¹²	10 ⁻⁹	10 ⁻³
1 бар	10 ⁵	10 ⁻⁴	0,100	10 ²	10 ⁸
1 мбар	10 ²	10 ⁻⁷	10 ⁻⁴	0,100	10 ⁵
1 дин/см ² (мкбар)	0,100	10 ⁻¹⁰	10 ⁻⁷	10 ⁻⁴	10 ²
1 кгс/см ² (1 ат)	9,81·10 ⁴	9,81·10 ⁻⁵	9,81·10 ⁻²	98,1	9,81·10 ⁷
1 атм	1,01·10 ⁵	1,01·10 ⁻⁴	0,101	101	1,01·10 ⁸
1 мм вод.ст. (кгс/м ²)	9,81	9,81·10 ⁻⁹	9,81·10 ⁻⁶	9,81·10 ⁻³	9,81·10 ³
1 мм рт.ст.	133,3	1,33·10 ⁻⁷	1,33·10 ⁻⁴	0,133	1,33·10 ⁵

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральный закон от 22 июля 2008 года № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

2. Постановление Правительства РФ от 31 марта 2009 года № 272 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска».

3. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утверждена приказом МЧС от 10.07.2009 г. № 404, зарегистрировано в Минюсте от 17.08.2009 г. № 14541).

4. СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной опасности.

5. ГОСТ 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля (утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27.12.2012г. № 1971-ст).

6. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств (утв. Приказом Ростехнадзора России от 11.03.2013г. № 96, зарегистрировано в Минюсте от 16.04.2013 г. № 28138).

7. Постановление Правительства РФ № 87 от 16 февраля 2008 г. «О составе разделов проектной документации и требования к их содержанию».

8. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.: в 2-х кн. / А.Н.Баратов, А.Я. Корольченко [и др.]. – М.: Химия, 1990.

9. Корольченко, А.Я. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: справ. изд.: в

2-х кн./ А.Я. Корольченко, В.А. Корольченко. – М.: Пожнаука. – 2004.

10. Монахов, В.Т. Показатели пожарной опасности веществ и материалов. Анализ и предсказание. Газы и жидкости / В.Т. Монахов. – М.: ВНИИПО, 2007.

11. ГОСТ Р 51901.13-2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей.

12. РД-03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов (утв. Госгортехнадзором России 10.07.01 № 30).

13. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов / Д.М. Гордиенко, Ю.Н. Шебеко, А.Ю. Шебеко [и др.]. – М.: ВНИИПО, 2012.

14. Оценка пожарного риска на производственных объектах: учебное пособие / Ю.И. Иванов, В.А. Зубарева, Д.А. Бесперстов [и др.]. – Кемерово, КемТИПП, 2014.

15. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий / И.А. Болодьян, Ю.И. Шебеко, В.Л. Карпов [и др.]. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2006.

16. Средства пожарной автоматики. Область применения. Выбор типа: рекомендации – М.: ВНИИПО, 2004.

17. Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (утверждена приказом МЧС от 30.06.2009г. № 382, зарегистрировано в Минюсте от 06.08.2009 г. № 14486).

18. Федеральный закон от 21 июля 1997г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (в ред. от 04.03.2013г.).

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Иванов Юрий Иосифович
Туманова Тамара Александровна
Бесперстов Дмитрий Александрович

**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ. ОЦЕНКА ПОЖАРНЫХ РИСКОВ
НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

Учебно-практическое пособие
для студентов специальности 20.05.01
«Пожарная безопасность» всех форм обучения

Редактор *Е.Н. Шуранова*
Технический редактор *О.П. Долгополова*
Художественный редактор *О.П. Долгополова*

ЛР № 020524 от 02.06.97
Подписано в печать 27.03.2017. Формат 60x84^{1/16}
Бумага типографская. Гарнитура Times New Roman
Уч.-изд.л. 8,9. Тираж 100 экз.
Заказ № 5.

Оригинал-макет изготовлен в лаборатории множительной техники
Кемеровского технологического института пищевой промышленности (университета)
650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 7

ПЛД № 44-09 от 10.10.99
Отпечатано в лаборатории множительной техники
Кемеровского технологического института пищевой промышленности (университета)
650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 7