



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

КЕМЕРОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

**ОЦЕНКА ПОЖАРНОГО РИСКА  
НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

Учебное пособие

Для студентов вузов

Кемерово 2013

**УДК 614.84(075)**

**ББК 38.96я7**

**О-93**

*Рецензенты:*

**А.И. Фомин**, д-р техн. наук, профессор кафедры аэрологии, охраны труда и природы ФГБОУ ВПО КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева;

**А.Г. Титов**, заместитель начальника ГУ МЧС России по Кемеровской области, начальник управления надзорной деятельности, полковник внутренней службы

*Рекомендовано редакционно-издательским советом  
Кемеровского технологического института  
пищевой промышленности*

О-93 Оценка пожарного риска на производственных объектах: учебное пособие / сост. Ю.И. Иванов, В.А. Зубарева, Д.А. Беспёрстов, Н.А. Пашкевич; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2013. – 228 с.

ISBN

В пособии рассматриваются расчетные методы, применяемые при проведении расчетов по оценке пожарного риска на производственных объектах с наличием горючих газов, легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, а также сжиженных углеводородных газов, сжиженного природного газа и твердой пожарной нагрузки. Приведены сведения о пожаровзрывоопасных и физико-химических свойствах наиболее распространенных и широко применяемых горючих веществ и материалов, а также сведения о частотах реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий и частоты возникновения пожаров. Последовательность и порядок проведения расчетов, определение исходных данных отражены в типовых примерах расчетов величин пожарного риска.

Предназначено для студентов технических вузов, обучающихся по специальности 280705 «Пожарная безопасность» и направлению 280700 «Техносферная безопасность». Может быть полезно инженерно-техническим работникам организаций, преподавателям вузов, слушателям курсов повышения квалификации.

**УДК 614.84(075)**

**ББК 38.96я7**

ISBN

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

© КемТИПП, 2013

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	6
<b>1. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ПО ОЦЕНКЕ ПОЖАРНОГО РИСКА</b> .....	11
<b>2. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПО ОЦЕНКЕ ПОЖАРНОГО РИСКА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ</b> .....	17
2.1. Анализ пожарной опасности объекта (производства) ....	17
2.2. Определение частоты реализации пожароопасных ситуаций.....	23
2.3. Построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития.....	36
2.4. Оценка последствий воздействия ОФП на людей для различных сценариев его развития.....	54
2.5. Анализ наличия систем пожарной безопасности зданий (объектов).....	71
<b>3. ПОРЯДОК ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА НА ОБЪЕКТЕ</b> .....	77
3.1. Потенциальный пожарный риск на территории объекта и в селитебной зоне вблизи объекта.....	77
3.2. Потенциальный риск в зданиях объекта .....	79
3.3. Индивидуальный пожарный риск в зданиях и на территории объекта.....	83
3.4. Индивидуальный и социальный пожарный риск в селитебной зоне вблизи объекта.....	85
3.5. Потенциальный, индивидуальный и социальный пожарный риск для линейной части магистральных трубопроводов .....	86
<b>4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ АВАРИЙ С ПОЖАРАМИ И ВЗРЫВАМИ</b> .....	91
4.1. Истечение жидкости и газов из резервуаров при различных сценариях их разрушения .....	91
4.1.1. Истечение жидкости .....	91
4.1.2. Истечение сжатого газа .....	94

4.1.3. Истечение сжиженного газа из отверстия в резервуаре .....	95
4.1.4. Растекание жидкости при квазимгновенном разрушении резервуара .....	96
4.2. Количественная оценка массы горючих веществ, поступающих в окружающее пространство в результате возникновения пожароопасных ситуаций .....	99
4.2.1. Предпосылки, положенные в основу количественной оценки массы горючих веществ .....	99
4.2.2. Разгерметизация надземного резервуара .....	101
4.2.3. Масса паров ЛВЖ, выходящих через дыхательную арматуру.....	103
4.2.4. Масса паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности .....	104
4.2.5. Расчет массы газа (М, т), находящегося в секции линейной части магистрального газопровода .....	107
4.3. Оценка размеров взрывоопасных зон.....	110
<b>5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНЫ ДАВЛЕНИЯ ПРИ СГОРАНИИ ГАЗО-, ПАРО- ИЛИ ПЫЛЕВОЗДУШНОГО ОБЛАКА.....</b>	<b>112</b>
5.1. Определение эффективного энергозапаса горючей смеси.....	112
5.2. Классификация горючих веществ по степени чувствительности .....	115
5.3. Классификация окружающего пространства по степени загроможденности.....	117
5.4. Классификация режимов сгорания облака.....	118
5.5. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн давления.....	120
5.6. Расчет волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сниженным газом.....	122
<b>6. ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....</b>	<b>124</b>
6.1. Пожар пролива .....	124
6.2. «Огненный шар» .....	128
6.3. Определение зон поражения при пожаре-вспышке и факельном горении .....	129

<b>7. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ОТ НАЧАЛА ПОЖАРА ДО БЛОКИРОВАНИЯ ЭВАКУАЦИОННЫХ ПУТЕЙ ОПАСНЫМИ ФАКТОРАМИ ПОЖАРА И РАСЧЕТНОГО ВРЕМЕНИ ЭВАКУАЦИИ .....</b>	<b>132</b>
7.1. Метод определения времени от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара.....	132
7.2. Метод определения расчетного времени эвакуации.....	138
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>144</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А. Некоторые свойства и показатели пожарной опасности веществ и материалов .....</b>	<b>146</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Некоторые свойства и показатели пожарной опасности смесей и технических продуктов.....</b>	<b>157</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В. Значения показателей пожарной опасности по типовой горючей нагрузке в помещениях ....</b>	<b>167</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Физические свойства сухого воздуха при давлении 101325 Па.....</b>	<b>175</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Примеры задач .....</b>	<b>176</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Человечество с самого начала своей истории постоянно сталкивалось с такими различными природными опасностями, как землетрясение, наводнение, ураганы, грозы, лесные пожары и т. п. По мере своего интеллектуального развития (овладение огнем, ремеслами, различными технологиями и процессами и т. д.) появились новые виды опасностей, и прежде всего пожарная опасность.

Современные условия жизни общества способствуют росту числа пожаров и размеров социально-экономических последствий от них во всем мире. По данным Центра пожарной статистики (ЦПС) – подразделения при Международной ассоциации пожарно-спасательных служб (КТИФ), ежегодно в мире возникает более 2 млн пожаров, при которых погибает порядка 40 тыс. человек и уничтожается материальных ценностей на десятки миллиардов денежных единиц. Пожары в XX и начавшемся XXI в. стали настоящим бедствием для человечества.

Под опасностью в широком смысле следует понимать любое воздействие или изменившееся состояние объекта, способное нанести вред или ущерб природе, человечеству, группе людей, обществу, живому существу, механизму, системе. Опасности в основе своей материальны. Поэтому в борьбе с опасностями очень важно выделить материальные объекты, которые являются их носителями. К таким объектам относятся: предметы труда, средства труда (машины, станки, инструменты, сооружения, здания и т. д.), различные виды энергии (электрическая, химическая, механическая, тепловая, атомная и др.), предметы труда и полуфабрикаты, природно-климатическая среда, люди. Оценка того или иного фактора как опасного или безопасного зависит от силы, интенсивности, длительности его воздействия на объект, а также от чувствительности или устойчивости к этому воздействию со стороны самого объекта.

Практика свидетельствует о том, что абсолютная безопасность недостижима. Стремление к абсолютной безопасности в ряде случаев вступает в антагонистическое противоречие с тех-

ническими и экономическими возможностями общества на данном этапе его развития.

Опасность всегда выражается через связь двух сторон. Одна из них – субъекты опасности (природные опасности, техногенные процессы, движущиеся или иные потенциально опасные материальные объекты, негативные или ошибочные действия и т. п.) – выступают источником, носителем опасности. Другая сторона – объекты опасности (люди, их сообщества, материальные объекты, объекты природы) – являются потенциально пострадавшей стороной, которая может испытать на себе негативное, чаще поражающее воздействие субъекта опасности. При этом обе стороны могут быть составляющими одного и того же предмета или явления. Например, промышленное предприятие, на котором по внутренним причинам возникла авария. В этом случае предприятие в целом одновременно оказывается и субъектом, и объектом опасности.

Степень опасности зависит от вероятности ее реализации, энергетической мощности возможных явлений или процессов, интенсивности возможного воздействия на объект, а также от уязвимости и защищенности от них объекта опасности. Опасности носят стохастический (вероятностный) характер, т. е. могут проявиться или не проявиться.

Условно опасность можно представить в двух формах – в форме вызовов и в форме угроз. Под вызовом понимается совокупность обстоятельств, порождающих гипотетическую (предположительную) опасность, которая в перспективе может превратиться в непосредственную опасность.

Угрозы представляют собой непосредственную опасность возникновения тех или иных нежелательных событий, а также наличие обстоятельств, стимулирующих эти события. Такими обстоятельствами могут быть природные, общественные и техногенные закономерности, обуславливающие опасность, структурные и функциональные недостатки систем безопасности.

Официальная статистика свидетельствует, что ежегодно в России происходит 240–260 тыс. пожаров, огнем уничтожается до 70 тыс. строений, на пожарах погибают до 20 тыс. человек.

В процессе развития пожара в производственных зданиях сгорают технологическое оборудование, материальные ценности, перерабатываемые материалы и готовая продукция. Воздействию огня и высокой температуры (1100–1200 °С) подвергаются также строительные конструкции, из которых выполнено здание. При высоких температурах горят конструкции из дерева и пластмасс, теряют прочность металлические конструкции, разрушаются конструкции из монолитного или сборного железобетона.

Возникновение пожаров, их развитие и, как следствие, гибель и травматизм людей обусловлены двумя основными причинами: техническими и социальными. К техническим причинам можно отнести степень износа технологического оборудования и инженерных коммуникаций, нарушение технологического регламента и безопасных условий эксплуатации оборудования и бытовых приборов, отсутствие систем предотвращения пожара и противопожарной защиты, снижающих тяжесть последствий и обеспечивающих уровень безопасности людей. К социальным причинам в первую очередь относится уровень образования людей в области пожарной безопасности, социальное положение, уровень жизни, состояние физического и психического здоровья.

В настоящее время для оценки опасности возникновения пожара (взрыва) используются методы, которые можно разделить на две группы. К первой относятся методы оценки уровня пожарной опасности, основанные на индексации опасностей (детерминированные методы). Они позволяют определить условный уровень пожаровзрывоопасности объекта и используются в основном для их классификации.

Вторая группа объединяет статистико-вероятностные методы, которые наиболее приемлемы для расчета вероятности возникновения пожара (взрыва) на объекте, так как они учитывают случайный характер событий и позволяют оценить фактический уровень пожарной опасности технологических аппаратов, процессов, а также производственных помещений и зданий.

В нормативных документах (ГОСТ 12.1.004-91, ФЗ № 123-

ФЗ от 22.07.2008 г.) указано, что объекты пожара, которые могут привести к массовому поражению людей, находящихся на этих объектах и окружающей территории, опасными и вредными производственными факторами, опасными факторами пожара и их вторичными проявлениями, должны иметь системы обеспечения пожарной безопасности, обеспечивающие минимальную возможную вероятность возникновения пожара. Вероятностные методы могут использоваться не только для оценки пожарной опасности технологических установок и систем, но и при разработке мер по повышению противопожарной защиты объекта.

Опасности аварий на пожаровзрывоопасных и химически опасных объектах можно характеризовать такими количественными показателями, как частота событий, возможная тяжесть последствий аварий, величина энергии взрыва, материальный ущерб, масштабы возможных чрезвычайных ситуаций и критериями риска.

Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ [1] устанавливает требования о необходимости анализа риска опасных производственных объектов. В методических указаниях по проведению анализа риска опасных производственных объектов (РД-03-418-01 [11]) содержится общая методология оценки риска, которая включает анализ частоты, последствий неблагоприятных событий и неопределенности результатов, а также отмечается, что меры по уменьшению вероятности аварии должны иметь приоритет над мерами по снижению последствий аварий.

Пожарный риск является одним из ключевых понятий Федерального закона от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (далее ФЗ № 123-ФЗ). Согласно п. 7 статьи ФЗ № 123-ФЗ, порядок проведения расчетов по оценке пожарного риска определяется нормативными 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 рис-

ка», которым утверждены «Правила проведения расчетов по оценке пожарного риска». Согласно п. 5 указанных Правил, определение расчетных величин пожарного риска проводится по методикам, утвержденным МЧС России.

В соответствии с указанным постановлением Правительства РФ, в 2009 г. в отношении производственных объектов была разработана и утверждена «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах». Данная методика утверждена приказом МЧС России от 10 июля 2009 г. № 404, зарегистрирована в Минюсте РФ 17 августа 2009 г. № 14541.

В пособии рассматриваются расчетные методы, используемые при проведении расчетов по оценке пожарного риска на производственных объектах. Кроме того, в пособии приведены сведения о пожаровзрывоопасных и физико-химических свойствах наиболее распространенных и широко применяемых горючих веществ и материалов, а также сведения о частотах реализации иницирующих пожароопасные ситуации событий и частоты возникновения пожаров.

# 1. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ПО ОЦЕНКЕ ПОЖАРНОГО РИСКА

Постановлением Правительства РФ от 31 марта 2009 г. № 272 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска» [9] утверждены «Правила проведения расчетов по оценке пожарного риска». Согласно указанным правилам, расчеты по оценке пожарного риска проводятся путем сопоставления расчетных величин пожарного риска с соответствующими нормативными значениями пожарных рисков, установленными ФЗ № 123-ФЗ.

При проведении расчета по оценке социального пожарного риска учитывается степень опасности для группы людей в результате воздействия опасных факторов пожара, ведущих к гибели 10 человек и более.

Определение расчетных величин пожарного риска проводится по методикам, утвержденным МЧС России. В настоящее время утверждены приказами МЧС следующие методики:

- «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» (приказ МЧС от 30.06.2009 г. № 382, зарегистрировано в Минюсте от 06.08.2009 г. № 14486);

- «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (приказ МЧС от 10.07.2009 г. № 404, зарегистрировано в Минюсте от 17.08.2009 г. № 14541).

Документ «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» разработан на основе:

- ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования»;

- ГОСТ Р 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля»;

- «Руководства по оценке пожарного риска для промышленных предприятий»;

– РД 03-418-01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов»;

– РД 03-409-01 «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей»;

– международных руководств по оценке пожарного риска.

Изложенные в настоящем пособии положения неприменимы:

– для производственных объектов специального, в том числе военного назначения;

– объектов производства, переработки, хранения радиоактивных и взрывоопасных веществ и материалов;

– объектов уничтожения и хранения химического оружия и средств взрыва;

– объектов, расположенных в лесах.

В общих чертах алгоритм обеспечения пожарной безопасности любого объекта защиты, кроме вышеуказанных, можно сформулировать в виде схемы, представленной на рис. 1.

Из рис. 1 следует, что, проводя анализ пожарной опасности объекта защиты, нужно сначала определить и проанализировать все пожарные риски, присущие данному объекту, затем оценить их текущие значения, определить допустимые значения для всех пожарных рисков. После этого нужно подобрать или разработать методы и технологии управления каждым риском, использовать их и тем самым обеспечить пожарную безопасность объекта защиты.

Эта общая схема может быть детализирована на каждом своем этапе, например, для определения пожарных рисков специалисты предлагают использовать метод «дерева событий».

Оценка пожарного риска, согласно ст. 94 ФЗ № 123-ФЗ и Правилам проведения расчетов по оценке пожарного риска, включает следующие этапы:

- 1) анализ пожарной опасности производственного объекта;
- 2) определение частоты реализации пожароопасных ситуаций;
- 3) построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития;
- 4) оценка последствий воздействия опасных факторов пожара на людей для различных сценариев его развития;
- 5) анализ систем обеспечения пожарной безопасности.

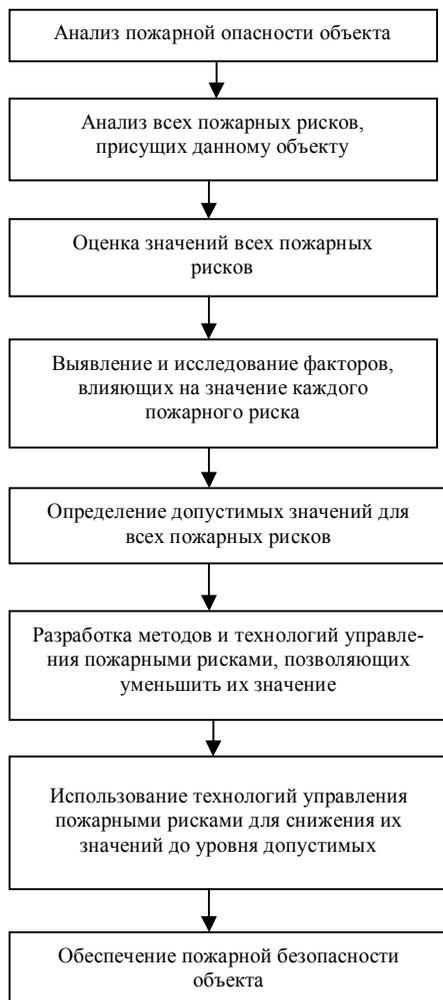


Рис. 1. Алгоритм обеспечения пожарной безопасности объекта

При оценке пожарного риска допускается использовать методы оценки времени блокирования эвакуационных путей и

расчетного времени эвакуации, изложенные в методиках определения расчетных величин пожарного риска, утвержденных в установленном порядке.

Расчеты пожарного риска при определении категорий наружных установок по пожарной опасности проводятся по методам, изложенным в своде правил СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности», устанавливающим порядок определения классификационных признаков категорий наружных установок производственного и складского назначения по пожарной опасности.

Расчетные величины пожарного риска являются количественной мерой возможности реализации пожарной опасности объекта и ее последствий для людей в результате воздействия на них опасных факторов пожара, в том числе:

- риск гибели работника объекта;
- риск гибели людей, находящихся в селитебной зоне вблизи объекта.

Риск гибели людей в результате воздействия опасных факторов пожара на объекте характеризуется числовыми значениями индивидуального и социального пожарных рисков. Статьей 93 ФЗ № 123-ФЗ установлены следующие нормативные значения пожарного риска для производственных объектов:

– величина индивидуального пожарного риска в зданиях, сооружениях, строениях и на территориях производственных объектов не должна превышать одну миллионную в год, т. е.  $10^{-6}$  на человека в год;

– для производственных объектов, на которых обеспечение величины индивидуального пожарного риска  $10^{-6}$  в год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов, допускается увеличение индивидуального пожарного риска до одной десятитысячной в год ( $10^{-4}$  1/год). 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 опасных факторов пожара на производственном объекте для людей, находящихся в селитебной зоне вблизи объекта, не должна превышать  $10^{-8}$  1/год;

– величина социального пожарного риска воздействия опасных факторов пожара на производственном объекте для людей, находящихся в селитебной зоне вблизи объекта, не должна превышать  $10^{-7}$  1/год.

К производственным объектам, на которых обеспечение величины индивидуального пожарного риска  $10^{-6}$  1/год невозможно в связи со спецификой функционирования технологических процессов и для которых допускается увеличение индивидуального пожарного риска до  $10^{-4}$ , рекомендуется относить:

– опасные производственные объекты в соответствии с Федеральным законом от 21 июля 1997 г. ФЗ № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов»;

– 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.

Результаты оценки пожарного риска используются:

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

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

- 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 РФ № 87 от 16 февраля 2008 г. «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию».

Для проведения расчетов необходимо проанализировать следующие данные:

- объемно-планировочные решения объекта защиты;
- теплофизические характеристики ограждающих конструкций и размещенного на объекте оборудования;
- вид, количество и расположение горючих материалов;
- количество и вероятность расположения людей в здании и их мобильность;
- материальную и социальную значимость объекта;
- наличие и работоспособность систем обнаружения и тушения пожара, противодымной защиты и огнезащиты, системы обеспечения безопасности людей.

При этом учитывается:

- вероятность возникновения пожара;
- возможная динамика развития пожара;
- наличие и характеристики систем противопожарной защиты (СППЗ);
- вероятность и возможные последствия воздействия пожара на людей, конструкцию здания и материальные ценности;
- соответствие объекта и его СППЗ требованиям противопожарных норм.

На основе анализа риска разрабатывается и корректируется комплекс инженерно-технических и организационных мероприятий, направленных на обеспечение пожарной безопасности объекта защиты.

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

### **2.1. Анализ пожарной опасности объекта (производства)**

Анализ пожарной опасности объекта защиты заключается в определении условий образования горючей среды и появления в ней источников зажигания, приводящих к пожару; вероятных путей распространения пожара и необходимых средств технической защиты, а также систем сигнализации и пожаротушения с параметрами введения в действие, соответствующими динамике развития пожара на объекте.

Анализ пожарной опасности производства является одним из важнейших элементов систем организационных мероприятий, которые затем реализуются технически по четко разработанному плану противопожарной защиты. Анализ пожарной опасности включает следующие направления:

- определение наличия сгораемых веществ и материалов, обращающихся в процессе производства;
- определение взрывопожарной опасности веществ и материалов, обращающихся в процессе производства;
- определение наличия потенциальных источников зажигания;
- моделирование ситуаций, при которых возможен аварийный режим работы технологического оборудования (установок, устройств, аппаратов, оборудования), в том числе и от неверных действий обслуживающего персонала;
- выявление наиболее взрывоопасных помещений, зданий с точки зрения наличия сгораемых материалов и потенциальных источников зажигания;
- моделирование развития возможного пожара в здании или помещении, направления распространения огня и дыма, действий рабочих и служащих по сигналу пожарной тревоги;

- анализ достаточности и полноты выполнения мероприятий технической (конструктивной) защиты зданий и технологических процессов предприятия;

- определение необходимого количества первичных средств пожаротушения, необходимости устройства автоматических систем (комплексов) пожарной сигнализации и пожаротушения исходя из расчета возможного максимального ущерба от смоделированного пожара на предприятии и требований нормативных технических документов по пожарной безопасности;

- определение наличия и достаточности для целей пожаротушения ближайших источников противопожарного водоснабжения (ИППВ) и возможности установки на них пожарной техники. Необходимость устройства в организации внутреннего противопожарного водопровода;

- составление оперативно-планирующей документации (план тушения пожара и ликвидации аварий – ПТПИЛА);

- определение необходимого количества членов ДПД и их оснащенности, а также порядка их привлечения к работе по предупреждению и борьбе с пожарами;

- организация обучения членов ДПД и лиц, ответственных за пожарную безопасность (ПБ), и практических тренировок по отработке действий персонала в случае возникновения пожара или аварии.

Анализ пожарной опасности предприятия дает возможность комплексно оценить необходимость и последовательность проведения первоочередных организационных мероприятий по обеспечению пожарной безопасности предприятия, определить необходимость и объем выделения средств по решению вышеуказанных вопросов.

Анализ пожарной опасности объекта, согласно ст. 94 ФЗ № 123-ФЗ, является одной из составляющих в оценке пожарного риска и предусматривает:

- анализ пожарной опасности технологической среды и параметров технологических процессов на 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.

При анализе пожарной опасности технологической среды и параметров технологических процессов на объекте используются следующие сведения:

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

- технологические параметры оборудования (температура, давление, уровень заполнения, материальные потоки) и подводящих и отводящих трубопроводов (диаметр, толщина стенки, расстояние до отсекающей (запорной) арматуры);

- параметры исполнительных механизмов систем противоаварийной защиты (время закрытия 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 ст. 133 и табл. 1 приложения к ФЗ №123-ФЗ. Обязательными показателями являются:

- а) для газов: группа горючести, температура самовоспламенения, концентрационные пределы распространения пламени, максимальное давление взрыва, скорость нарастания давления взрыва;

- б) для жидкостей: группа горючести, температура вспышки, воспламенения и самовоспламенения, температурные пределы распространения пламени;

- в) для твердых веществ и материалов (за исключением

строительных материалов): группа горючести, температуры воспламенения и самовоспламенения, коэффициент дымообразования, показатель токсичности продуктов горения;

г) для твердых дисперсных веществ: группа горючести, температура самовоспламенения, максимальное давление взрыва, скорость нарастания давления взрыва.

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

Некоторые свойства и показатели пожарной опасности наиболее распространенных веществ и материалов приведены в прил. А и Б.

Согласно «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», определение перечня пожароопасных аварийных ситуаций и параметров для каждого технологического процесса осуществляется на основе анализа пожарной опасности каждого из технологических процессов, предусматривающего выбор ситуаций, при реализации которых возникает опасность для людей, находящихся в зоне поражения опасными факторами пожара, взрыва и сопутствующими проявлениями опасных факторов пожара.

Ситуации, в результате которых не возникает опасность для жизни и здоровья людей, как правило, не рассматриваются и не учитываются при расчете пожарного риска.

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 рассматривать:

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

- разгерметизацию технологического оборудования, вызванную 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).

Выявление аварийных ситуаций осуществляется на основании изучения:

- структуры объекта, пространственного размещения его элементов;

- основных операций, осуществляемых на объекте, технологических схем, используемого оборудования;

- перечня веществ и материалов, применяемых на объекте;

- перечня событий, которые могут являться причинами пожароопасных ситуаций;

- отказов оборудования, имевших ранее место;

- данных по надежности используемого оборудования;

- возможных ошибочных действий персонала;
- метеорологических, геофизических и гидрологических характеристик места расположения объекта.

Для выявления пожароопасных ситуаций необходимо произвести деление технологического оборудования (технологических систем), при их наличии на объекте, на участки исходя из возможности раздельной герметизации этих участков при возникновении аварии. При этом должны быть рассмотрены пожароопасные ситуации как на основном, так и на вспомогательном технологическом оборудовании. Кроме того, при выявлении пожароопасных ситуаций необходимо учитывать возможность возникновения пожара в зданиях, строениях и сооружениях (далее по тексту – здания) различного назначения, расположенных на территории производственного объекта.

В перечне пожароопасных ситуаций применительно к каждому участку, технологической установке, зданию производственного объекта выделяются группы пожароопасных ситуаций, которым соответствуют одинаковые модели возникновения и развития.

При анализе пожароопасных ситуаций, связанных с разгерметизацией технологического оборудования, следует рассматривать утечки при различных диаметрах истечения (в том числе максимальные – при полном разрушении оборудования или подводящих/отводящих трубопроводов).

При проведении расчетов пожарного риска должен быть разработан полный перечень аварийных ситуаций, который, с одной стороны, должен охватывать все технологические блоки, участки, технологические установки, здания, строения и сооружения объекта, с другой – согласно этому перечню, должны быть проведены необходимые расчеты с учетом вариации различных материалов при разработке мероприятий по обеспечению пожарной безопасности.

Итогом анализа пожарной опасности производственных объектов должен явиться комплекс мер, позволяющих изменить параметры технологического процесса до уровня, обеспечивающего допустимый пожарный риск.

## **2.2. Определение частоты реализации пожароопасных ситуаций**

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

- 1) об отказах оборудования, используемого на производственном объекте;
- 2) параметрах надежности используемого на производственном объекте оборудования;
- 3) ошибочных действиях персонала производственного объекта;
- 4) гидрометеорологической обстановке в районе размещения производственного объекта;
- 5) географических особенностях местности в районе размещения производственного объекта.

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.

Определение частоты реализации пожароопасных ситуаций является одним из наиболее важных этапов проведения расчетов по оценке пожарного риска, который в значительной мере определяет достоверность полученных результатов расчета значений риска.

Рекомендуемые сведения по частотам реализации инициирующих пожароопасные ситуации событий для некоторых типов оборудования производственных объектов, частотам утечек из технологических трубопроводов приведены в табл. 1, 2. При использовании данных, приведенных в табл. 1,

2 для отдельного резервуара, емкости, сосуда, аппарата, технологического трубопровода, необходимо учитывать частоты разгерметизации для всех размеров утечек, указанных для данной единицы технологического оборудования. При отсутствии данных допускается использовать информацию по частотам реализации пожароопасных ситуаций по сведениям для более пожароопасных объектов.

Таблица 1

Частоты разгерметизации для технологического оборудования производственных объектов

Наименование оборудования	Иницирующее аварию событие	Диаметр отверстия истечения, мм	Частота разгерметизации, год <sup>-1</sup>
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
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	$1,0 \cdot 10^{-4}$

Продолжение табл. 1

1	2	3	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 раз- рушение	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Резервуары для хранения ЛВЖ и ГЖ при давлении, близком к атмо- сферному (при единичном объеме $450 \text{ м}^3$ и более)	Разгерметизация с последующим истечением жид- кости в обвало- вание	25	$8,8 \cdot 10^{-5}$
		100	$1,2 \cdot 10^{-5}$
		Полное раз- рушение	$5,0 \cdot 10^{-6}$
Резервуары для хранения ЛВЖ и ГЖ при давлении, близком к атмо- сферному (при единичном объеме менее $450 \text{ м}^3$ )	Разгерметизация с последующим истечением жид- кости в обвало- вание	25	$5,0 \cdot 10^{-4}$
		100	$5,0 \cdot 10^{-5}$
		Полное раз- рушение	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Химические реак- торы	Разгерметизация с последующим истечением жид- кости или двух- фазной 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 раз- рушение	$8,0 \cdot 10^{-6}$
Одностенные изо- термические ре- зервуары для хра- нения сжиженных газов	Разгерметизация с последующим истечением жид- кости в обвало- вание	Утечка па- ров	$2,0 \cdot 10^{-4}$
		150	$1,0 \cdot 10^{-4}$
		500	$8,0 \cdot 10^{-5}$
		Полное раз- рушение	$4,0 \cdot 10^{-5}$

1	2	3	4
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	–	$9,0 \cdot 10^{-5}$
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	$4,0 \cdot 10^{-5}$

*Примечания:* 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.

2. При определении частоты разгерметизации фильтров и кожухотрубных теплообменников указанное оборудование допускается рассматривать как аппараты под давлением.

3. Аппараты воздушного охлаждения допускается рассматривать как участки технологических трубопроводов, длина которых

соответствует суммарной длине труб в пучках теплообменника.

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<sup>-1</sup> на один аппарат (резервуар).

5. Для гибких соединений при проведении сливно-наливных операций в таблице приведена вероятность разгерметизации (разрушения) на одну сливно-наливную операцию.

Таблица 2

Частоты утечек из технологических трубопроводов

Диаметр трубопровода, мм	Частота утечек, (м <sup>-1</sup> ·год <sup>-1</sup> )				
	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	$2,4 \cdot 10^{-7}$	$9,8 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$3,2 \cdot 10^{-9}$

Частота возникновения пожара в здании (помещении) Q (год<sup>-1</sup>) может быть определена исходя из данных по частотам возникновения пожаров в различных зданиях и площади здания (помещения). Рекомендуемые сведения по частотам возникновения пожаров в зданиях приведены в табл. 3.

Таблица 3

Частоты возникновения пожара для некоторых зданий  
производственных объектов

Объект	Частота возникновения пожара, (м <sup>2</sup> ·год <sup>-1</sup> )
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	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Необходимо отметить, что зависимость частоты возникновения пожара в здании от его площади не всегда является линейной. Частота возникновения пожара в здании (помещении)  $Q$  (год<sup>-1</sup>) может быть определена по следующей зависимости:

$$Q = \alpha \cdot F^{\beta}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – константы, определяемые для различных зданий по табл. 4;  
 $F$  – площадь здания (помещения) производственного объекта, м<sup>2</sup>.

Таблица 4

Значения констант  $\alpha$  и  $\beta$  для различных значений\*

Характеристика значения	$\alpha$	$\beta$
Здания пищевой, табачной промышленности	0,0011	0,6
Переработка горючих веществ, химическая промышленность	0,0069	0,46
Размещение электрического оборудования	0,0061	0,59
Обслуживание транспортных средств	0,00012	0,86
Текстильная промышленность	0,0075	0,35
Полиграфические предприятия, издательское дело	0,0007	0,91
Административные здания производственных объектов	0,00006	0,9
Другие виды зданий производственных объектов	0,0084	0,41

\* Использование формулы (1) и табл. 4 рекомендуется для помещений площадью более 1000 м<sup>2</sup>.

Удельная частота разгерметизации линейной части магистрального трубопровода определяется следующим образом:

- на основе статистических данных определяется базовая частота разгерметизации  $\lambda_{cp}$ . При отсутствии данных для вновь проектируемых магистральных трубопроводов допускается  $\lambda_{cp}$  принимать равной:

$$\lambda_{cp} = 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ 1}/(\text{г} \cdot \text{м}) \text{ — для магистральных газопроводов;}$$

$$\lambda_{cp} = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ 1}/(\text{г} \cdot \text{м}) \text{ — для магистральных нефтепроводов;}$$

- выделяются рассматриваемые при проведении расчетов типы разгерметизации:

для магистральных газопроводов:

$j = 1$  – проколы (трещины, точечные отверстия), определяемые как отверстия с диаметром 20 мм;

$j = 2$  – отверстия с диаметром, равным 10 % от диаметра

магистрального трубопровода;

$j = 3$  – разрыв, определяемый как образование отверстия размером, равным диаметру магистрального трубопровода;

для магистральных нефтепроводов:

$j = 1$  – «свищи» – отверстия с характерными размерами  $0,3 \cdot L_p / D$  ( $L_p$  – характерный размер продольной трещины,  $D$  – условный диаметр магистрального трубопровода), площадь дефектного отверстия  $0,0072 \cdot S_0$  ( $S_0$  – площадь поперечного сечения магистрального трубопровода);

$j = 2$  – трещины, характерный размер  $0,75 \cdot L_p / D$ , площадь дефектного отверстия  $0,0448 \cdot S_0$ ;

$j = 3$  – «гильотинный» разрыв, характерный размер  $0,75 \cdot L_p / D$ , площадь дефектного отверстия  $0,179 \cdot S_0$ .

Допускается при соответствующем обосновании учитывать и другие виды разгерметизации.

• рассматриваются шесть причин разгерметизации ( $i = 1 \dots 6$  – табл. 5);

• удельная частота разгерметизации линейной части магистрального трубопровода для  $j$ -го типа разгерметизации на участке  $m$  трубопровода определяется по формуле:

$$\lambda_j(m) = \lambda_{cp} \sum_{i=1}^6 \frac{f_{ij}(m)}{100}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{cp}$  – базовая частота разгерметизации трубопровода, год<sup>-1</sup>;

$f_{ij}(m)$  – относительная доля  $i$ -й причины разгерметизации для  $j$ -го типа разгерметизации на участке  $m$  магистрального трубопровода.

• величины  $f_{ij}$  для различных типов разгерметизации для различных участков магистрального трубопровода определяются по формулам:

$$f_{1j} = f_{1jcp} \cdot K_{mc} \cdot K_{zm} \cdot K_{инб} \cdot K_{непл}, \quad (3)$$

$$f_{2j} = f_{1jcp} \cdot K_{\delta\delta}, \quad (4)$$

$$f_{3j} = f_{3jcp} \cdot K_{кмс} \cdot K_{кнз}, \quad (5)$$

$$f_{4j} = f_{4jcp} \cdot K_{\delta\delta\delta} \cdot K_{пер2}, \quad (6)$$

$$f_{5j} = f_{5jcp} \cdot K_{он}, \quad (7)$$

$$f_{6j} = f_{6jcp}, \quad (8)$$

где  $K_{мс}$ ,  $K_{зт}$ ,  $K_{ннб}$ ,  $K_{пер1}$ ,  $K_{\delta\delta}$ ,  $K_{кмс}$ ,  $K_{кнз}$ ,  $K_{\delta\delta\delta}$ ,  $K_{пер2}$ ,  $K_{он}$  – поправочные коэффициенты, определяемые по табл. 6 с учетом технических характеристик магистрального трубопровода.

Таблица 5

Среднестатистическая относительная доля аварий, вызванных данной причиной, на магистральных трубопроводах

Причина		Среднестатистическая относительная доля аварий, вызванных данной причиной, $f_{ij}(m)$ , %			
		Проколы (трещины), точечные отверстия	Отверстие	Разрыв	Всего
<i>I</i>		<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
$i=1$	Внешнее воздействие	13,2–16,8	26,6/26,2	9,7/6,5	49,5
$i=2$	Брак строительства, дефект материалов	10,6/11,3	4,7/4,6	1,2/0,6	16,5
$i=3$	Коррозия	15,2/15,2	0,2/0,2	0,0/0,0	15,4

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6
$i = 4$	Движение грунта, вызванное природными явлениями	1,8/2,2	2,2/2,2	3,3/2,9	7,3
$i = 5$	Ошибки оператора	3,0/3,0	1,6/1,6	0,0/0,0	4,6
$i = 6$	Прочие и неизвестные причины	6,5/6,5	0,2/0,2	0,0/0,0	6,7
Итого		50,3/55,0	35,51/35,0	14,2/10,0	100

*Примечание.* В числителе приведены значения для магистральных газопроводов, а в знаменателе – магистральных нефтепроводов.

Таблица 6

Поправочные коэффициенты к среднестатистической относительной доли аварии

Поправочный коэффициент	Значение поправочного коэффициента
1	2
1. Поправочный коэффициент $\kappa_{mc}$ , зависящий от толщины стенки трубопровода $\delta$ (мм)	$\kappa_{mc} = \exp[-0,275 \cdot (\delta - 6)]$
2. Поправочный коэффициент $\kappa_{zt}$ , зависящий от минимальной глубины заложения трубопровода (м): менее 0,8 м от 0,8 до 1 м более 1 м	$\kappa_{zt} = 1$ $\kappa_{zt} = 0,93$ $\kappa_{zt} = 0,73$

Продолжение табл. 6

1	2
<p>3. Поправочный коэффициент <math>\kappa_{ннб}</math> для участков переходов, выполненных методом наклонно направленного бурения (далее – ННБ):  на участках этих переходов  вне этих участков</p>	$\kappa_{ннб} = 0$ $\kappa_{ннб} = 1$
<p>4. Поправочный коэффициент <math>\kappa_{перл}</math> переходов через искусственные препятствия:  на переходах через автодороги, железные дороги и инженерные коммуникации  вне переходов либо на них предусмотрены защитные футляры (кожухи) из стальных труб с герметизацией межтрубного пространства</p>	$\kappa_{перл} = 2$ $\kappa_{перл} = 1$
<p>5. Поправочный коэффициент <math>\kappa_{\delta\delta}</math>, учитывающий применение материалов и средств контроля при строительстве:  для трубопроводов, построенных в соответствии с требованиями нормативных документов  при использовании улучшенных материалов и дополнительных средств контроля при строительстве и последующей эксплуатации трубопроводов</p>	$\kappa_{\delta\delta} = 1$ $\kappa_{\delta\delta} = 0,07$
<p>6. Поправочный коэффициент <math>\kappa_{ктс}</math>, учитывающий влияние толщины стенки трубопровода (мм) на частоту разгерметизации по причине коррозии:  менее 5  от 5 до 10  более 10</p>	$\kappa_{ктс} = 2$ $\kappa_{ктс} = 1$ $\kappa_{ктс} = 0,03$

1	2
<p>7. Поправочный коэффициент <math>\kappa_{кпз}</math>, учитывающий влияние применяемых систем защиты от коррозии:</p> <p>для трубопроводов, построенных в соответствии с требованиями нормативных документов</p> <p>при использовании улучшенной системы защиты (тип и качество изоляционного покрытия, электрохимическая защита, внутритрубная диагностика и т. п.)</p>	$\kappa_{кпз} = 1$ $\kappa_{кпз} = 0,016$
<p>8. Поправочный коэффициент <math>\kappa_{d2d}</math>, зависящий от диаметра трубопровода <math>D</math> (мм)</p>	$\kappa_{d2d} = \exp[-0,00156 \cdot (D - 274)]$
<p>9. Поправочный коэффициент <math>\kappa_{неп2}</math>, учитывающий прохождение трассы трубопровода через водные преграды и заболоченные участки:</p> <p>для водных преград</p> <p>для заболоченных участков</p> <p>при отсутствии переходов либо выполненных методом ННБ</p>	$\kappa_{неп2} = 5$ $\kappa_{неп2} = 2$ $\kappa_{неп2} = 1$
<p>10. Поправочный коэффициент <math>\kappa_{on}</math>, зависящий от диаметра трубопровода <math>D</math> (мм)</p>	$\kappa_{on} = \exp[-0,004 \cdot (D - 264)]$

Согласно ГОСТ Р 27.302-2009 «Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей» (гармонизированный национальный стандарт РФ со стандартом IEC 61025: 2006, NEQ), частоты реализации пожароопасных ситуаций и возникновения пожаров могут быть получены с использованием анализа дерева неисправностей (деревьев отказов, деревьев событий).

Дерево неисправностей – это организованное графическое

представление условий или других факторов, вызывающих нежелательное событие, называемое вершиной события. Представление проводят в понятной и доступной форме, позволяющей проанализировать и, по мере необходимости, перестроить ее таким образом, чтобы упростить идентификацию:

- факторов, воздействующих на надежность и характеристики эффективности системы, например, режимов неисправностей компонентов, ошибок оператора, условий окружающей среды, ошибок программного обеспечения, ошибок ремонтного персонала;

- противоречивых требований или спецификации, которые могут влиять на надежность и эффективность системы;

- общих событий, воздействующих более чем на один функциональный компонент, который может уменьшить преимущества резервирования.

Анализ дерева неисправностей является в основном дедуктивным методом анализа, нацеленным на точное определение причин или комбинации причин, приводящих к вершине события. Существует два метода проведения анализа дерева неисправностей – качественный и количественный.

При качественном методе вероятности событий или частоту их возникновения не рассматривают. Этот метод заключается в детальном анализе совокупности событий. Его применяют тогда, когда необходимо выявить возможные причины создания пожароопасных ситуаций без оценки реальной вероятности их возникновения.

При количественном методе в процессе детального анализа дерева неисправностей полностью моделируют изделие, процесс или систему и оценивают вероятность возникновения базисных событий или событий, выявленных в ходе анализа. Окончательным результатом является вероятность появления завершающего события, свидетельствующего о вероятности возникновения пожароопасного события (опасных факторов пожара).

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

Опасными факторами пожара (ОФП), согласно ФЗ № 123-ФЗ, являются факторы пожара, воздействие которых может привести к травме, отравлению или гибели человека и(или) к материальному ущербу.

К опасным факторам пожара, воздействующим на людей и имущество, относятся:

- пламя и искры;
- тепловой поток;
- повышенная температура окружающей среды;
- повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения;
- пониженная концентрация кислорода;
- снижение видимости в дыму.

К сопутствующим проявлениям опасных факторов пожара относятся:

- осколки, части разрушившихся зданий, сооружений, строений, транспортных средств, технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- радиоактивные и токсичные вещества и материалы, попавшие в окружающую среду из разрушенных технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- вынос высокого напряжения на токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- опасные факторы взрыва, произошедшего вследствие пожара;
- воздействие огнетушащих веществ.

При построении полей ОФП для различных сценариев его развития учитываются:

- 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;
- концентрация токсичных компонентов продуктов горения в помещении;
- снижение концентрации кислорода в воздухе помещения;
- задымление атмосферы помещения;
- среднеобъемная температура 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. При этом рассматриваются 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;
- 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,

При необходимости следует рассматривать иные процессы, которые могут иметь место при возникновении пожароопасных ситуаций и пожаров.

Для определения возможных сценариев возникновения и развития пожаров «Методикой по определению расчетных величин пожарного риска» рекомендуется использовать метод логических деревьев событий (логическое дерево).

**Логическое дерево событий** – графическое отображение общего характера развития возможных аварийных ситуаций и аварий с отражением причинно-следственной взаимосвязи событий.

Указанный метод представляет собой совокупность количественных или качественных приемов, которые используются для идентификации возможных исходов инициирующего события, а также их вероятностей и частот.

Применение метода логических деревьев событий позволяет определить развитие возможных пожароопасных ситуаций и пожаров, возникающих вследствие реализации событий, инициирующих пожароопасную ситуацию. Анализ дерева событий представляет собой «осмысливаемый вперед» процесс, то есть процесс, при котором исследование развития пожароопасной ситуации начинается с исходного события с рассмотрением цепи последующих событий, приводящих к возникновению пожара.

При построении дерева событий предполагается, что каж-

дое событие в последовательности представляет собой либо исправность, либо неисправность (ветвление «Да» / «Нет»). Следует отметить, что вероятности на дереве событий являются условными вероятностями. Метод логических деревьев событий представляет собой индуктивный тип анализа, в котором основным задаваемым вопросом является «что будет (случится), если ..?». Он обеспечивает взаимосвязь между функционированием (или отказом) разнообразных защитных систем и опасным событием, следующим после того, как происходит единичное инициирующее событие.

Достоинствами метода являются:

- простота по сравнению с другими, особенно при обеспечении его вспомогательными формами, унифицированными бланками, облегчающими на практике проведение анализа и представление результатов;

- невысокая трудоемкость, так как результаты могут быть получены одним специалистом в течение короткого времени и наиболее эффективным при исследовании объектов с известной технологией.

Сценарий возникновения и развития пожароопасной ситуации (пожара) на логическом дереве отражается в виде последовательности событий от исходного до конечного события (далее – 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 (ГОСТ Р 27.302-2009 «Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей»).

При построении логических деревьев событий учитываются следующие положения:

- выбирается пожароопасная ситуация, которая может повлечь за собой возникновение аварии с пожаром (взрывом) с дальнейшим его развитием;

- развитие пожароопасной ситуации и пожара должно

рассматриваться постадийно с учетом места ее возникновения на объекте оценки риска, уровня потенциальной опасности каждой стадии и возможности ее локализации и ликвидации. На логическом дереве событий стадии развития пожароопасной ситуации и пожара могут отображаться в виде прямоугольников или других геометрических фигур с краткими названиями этих стадий;

– переход с рассматриваемой стадии на новую определяется возможностью либо локализации пожароопасной ситуации или пожара на рассматриваемой стадии, либо развития пожара, связанного с вовлечением расположенных рядом зданий, помещений, а также технологического оборудования в результате влияния на них опасных факторов пожара (взрыва), возникших на рассматриваемой стадии. Условные вероятности переходов пожароопасной ситуации или пожара со стадии на стадию одной ветви или с ветви на ветвь определяются исходя из свойств вовлеченных в пожароопасную ситуацию или пожар горючих веществ (физико-химические и пожароопасные свойства, параметры, при которых вещества обращаются в технологическом процессе, и т. д.), условной вероятности реализации различных метеорологических условий (температура окружающей среды, скорость и направление ветра и т. д.), наличия и условной вероятности эффективного срабатывания систем противоаварийной и противопожарной защиты, величин зон поражения опасными факторами пожара, объемно-планировочных решений и конструктивных особенностей оборудования и зданий производственного объекта. При этом каждой стадии иногда присваивается идентификационный номер, отражающий последовательность переходов со стадии на стадию;

– переход со стадии на стадию, как правило, отображается в виде соединяющих линий со стрелками, указывающими направления развития пожароопасной ситуации и последующего пожара. При этом соединение стадий должно отражать вероятностный характер события с выполнением условия «И» или «ИЛИ», или «ДА», «НЕТ». Логический знак «И» означает, что вышестоящее событие возникает при одновременном наступлении нижестоящих событий (соответствует перемножению этих

вероятностей для оценки вероятности вышестоящего события). Знак «ИЛИ» означает, что вышестоящее может произойти вследствие возникновения одного из нижестоящих событий.

- для каждой стадии рекомендуется устанавливать уровень ее опасности, характеризующийся возможностью перехода пожароопасной ситуации или пожара на соседние с пожароопасным участки объекта;

- при повторении одним из путей части другого пути развития для упрощения построения логического дерева событий иногда вводят обозначение, представляющее собой соответствующую линию со стрелкой и надпись «на стадию (код последующей стадии)».

При построении логического дерева событий необходимо 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 объекта в результате воздействия на них опасных факторов пожара, взрыва.

При анализе логических деревьев событий руководствуются следующими положениями:

- возможностью предотвращения дальнейшего развития пожароопасной ситуации и пожара от количества стадий и времени их протекания (т. е. от длины пути развития пожароопасной ситуации и пожара). Это обусловливается большей вероятностью успешной ликвидации пожароопасной ситуации и пожара, связанной с увеличением времени на локализацию пожароопасной ситуации и пожара и количеством стадий, на которых эта локализация возможна;

- наличием у стадии разветвлений по принципу «или»,

одно из которых переходит на стадию локализации пожароопасной ситуации или пожара (например, тушение очага пожара, своевременное обнаружение утечки и ликвидация пролива, перекрытие запорной арматуры и т. п.), свидетельствует о возможности предотвращения дальнейшего развития пожароопасной ситуации и пожара по этому пути.

Для оценки вероятности перехода аварии со стадии на стадию необходимо, прежде всего, определение условий вероятности реализации различных ветвей дерева событий.

Значение частоты реализации отдельной стадии дерева событий или сценария определяется путем умножения частоты возникновения инициирующего события на условную вероятность развития по конкретному сценарию. Например, авария с разгерметизацией оборудования с горючим веществом в зависимости от условий может развиваться как с воспламенением, так и без воспламенения вещества.

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 условия вероятности мгновенного воспламенения и воспламенения с задержкой по времени в зависимости от массового расхода скорости истечения горючих газов, двухфазной среды или жидкости при разгерметизации типового технологического оборудования на объекте, согласно «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», приведены в табл. 7.

Таблица 7

Условная вероятность мгновенного воспламенения  
и воспламенения с задержкой

Массовый расход истечения, кг/с		Вероятность мгновенного воспламенения			Вероятность последующего воспламенения при отсутствии мгновенного воспламенения			Вероятность сгорания с образованием избыточного давления при последующем воспламенении		
					газ	двух-фазная смесь	жидкость	газ	двух-фазная смесь	жидкость
диапазон	номинальное среднее значение	газ	двух-фазная смесь	жидкость	газ	двух-фазная смесь	жидкость	газ	двух-фазная смесь	жидкость
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.

Согласно общепринятому определению, условная вероятность – это вероятность наступления одного события при условии, что другое событие уже произошло. Например, согласно табл. 7 для аварии, связанной с полным разрывом аппарата (трубопровода) и поступлением горючего газа или двухфазной горючей смеси в окружающее пространство, условные вероятности реализации различных сценариев для района размещения объекта в благоприятных для образования газопаровоздушного облака условий 20 % или 0,2 составят:

- мгновенного воспламенения  $P = 0,2$ ;
- последующее воспламенение при отсутствии мгновенного воспламенения  $P = (1 - 0,2) \cdot 0,24 = 0,192$ ;
- сгорание с образованием избыточного давления при

образовании газопаровоздушного облака и его последующем воспламенении при отсутствии мгновенного воспламенения  $P = (1 - 0,2) \cdot 0,24 \cdot 0,2 \cdot 0,6 \approx 0,023$ ;

– сгорание без образования избыточного давления при образовании газопаровоздушного облака и его последующем воспламенении при отсутствии мгновенного воспламенения  $P = (1 - 0,2) \cdot 0,24 \cdot 0,2 \cdot (1 - 0,6) \approx 0,015$ .

Условные вероятности воспламенения при различных диаметрах отверстия истечения при разгерметизации технологического оборудования на производственных объектах приведены в табл. 8 и 9.

Таблица 8

Условная вероятность воспламенения при различных диаметрах отверстия истечения

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 9

Условные вероятности мгновенного воспламенения и воспламенения с задержкой при различных диаметрах отверстия истечения

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

Условные вероятности различных сценариев развития аварий с выбросом из технологического оборудования сжиженных углеводородных газов (СУГ) при полном разрушении, согласно ГОСТ Р 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля», приведены в табл. 10.

Таблица 10

Условные вероятности различных сценариев развития аварий с выбросом из технологического оборудования сжиженных углеводородных газов (СУГ) при полном разрушении

Сценарий аварии	Вероятность	Сценарий аварии	Вероятность
Факел	0,0574	Сгорание с развитием избыточного давления	0,0119
«Огненный шар»	0,7039		
Горение пролива	0,0287	Без горения	0,0292
Сгорание облака	0,1689	Итого	1

На рис. 2–4 приведены упрощенные типовые логические деревья событий при возникновении и развитии пожароопасных ситуаций, связанных с разгерметизацией технологического оборудования на наружной установке с образованием горючих

жидкостей (ГЖ), легковоспламеняющихся жидкостей (ЛВЖ), сжиженного углеводородного газа (СУГ) и горючих газов (ГГ), которые могут использоваться при расчете величин пожарного риска для производственных объектов.

Приведенные типовые деревья событий описывают возникновение и развитие пожароопасной ситуации, только в пределах того технологического аппарата, на котором они возникают, то есть возможность эскалации пожаров (возникновение вторичных пожаров и развитие пожара в сторону соседних по отношению к месту возникновения первичных пожаров участков) не рассматривается.

При использовании деревьев событий для учета возможности эскалации на наружной установке с оборудованием под давлением целесообразно учитывать дополнительные сценарии, связанные с реализацией огненного шара с частотой реализации, указанной в табл. 10.

Пример «дерева событий» для количественного анализа сценария аварийной ситуации в блоке (стадия компрессирования аммиака) при разгерметизации фланцевого соединения компрессора аммиака К 301А представлен на рис. 5.

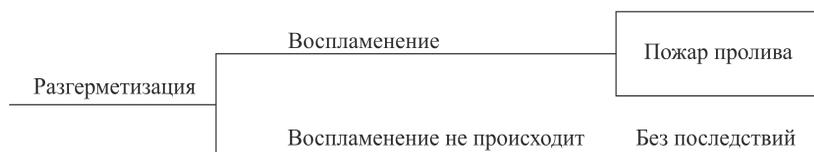


Рис. 2. Типовое дерево событий при возникновении и развитии пожароопасной ситуации, связанной с разгерметизацией единицы технологического оборудования истечением ГЖ



Рис. 3. Типовое дерево событий при возникновении и развитии пожароопасной ситуации, связанной с разгерметизацией единицы технологического оборудования истечением жидкой фазы двухфазной смеси СУГ или ЛВЖ

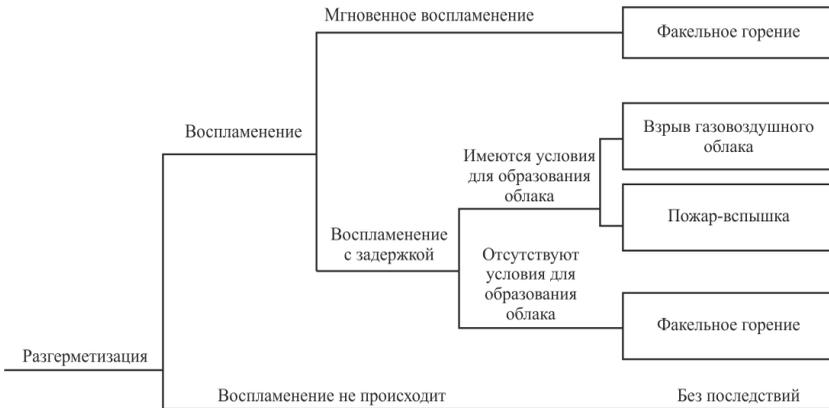


Рис. 4. Типовое дерево событий при возникновении и развитии пожароопасной ситуации, связанной с разгерметизацией единицы технологического оборудования истечением ГГ или паров ЛВЖ

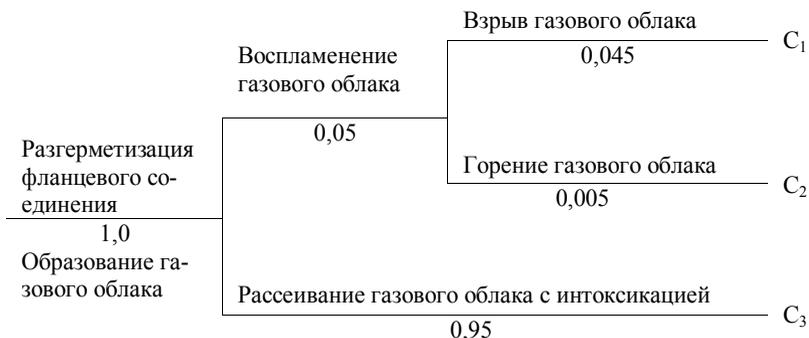


Рис. 5. Дерево событий при разгерметизации фланцевого соединения компрессора аммиака К 301А

Цифры рядом с наименованием события показывают условную вероятность возникновения этого события. При этом вероятность возникновения иницирующего события (разгерметизация фланцевого соединения с образованием газового облака) принята равной единице.

Из рис. 5 следует, что при условной вероятности разгерметизация фланцевого соединения  $P_0 = 1,64 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$  вероятность развития ситуаций по сценариям  $C_1$  и  $C_3$  составит:

$$P_{C_1} = 1,64 \cdot 10^{-5} \cdot 0,05 \cdot 0,045 = 3,69 \cdot 10^{-8} \text{ год}^{-1};$$

$$P_{C_3} = 1,64 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 = 1,56 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

При оценке пожарного риска с учетом возможности эскалации пожара на наружной установке на соседние участки объекта рассматриваются события, связанные с разрушением (повреждением) зданий, сооружений, технологического оборудования наружных установок, располагаемых на соседних с местом возникновения пожара участках, и/или вовлечением в пожар горючих веществ и материалов, обращающихся на соседних участках, при воздействии опасных факторов пожара и сопутствующих проявлениях указанных факторов.

Определение условной вероятности перехода и времени перехода пожара на наружных установках осуществляется с использованием следующих положений.

1. Время перехода пожара на соседние участки при эскалации пожара, возникшего на наружной установке. При невозможности его определения допускается принимать равным нулю.

2. Возможность эскалации (перехода на соседние участки) пожара следует рассматривать для следующих первичных сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров:

- факельного горения;
- пожаров проливов горючих веществ на поверхность;
- пожаров твердых горючих веществ;
- сгорания газопаровоздушной смеси в открытом пространстве в детонационном или дефлаграционном режиме с образованием волн давления;
- сгорания газопаровоздушной смеси в открытом пространстве в режиме пожара-вспышки.

3. В случае эскалации пожара следует учитывать возможность возникновения следующих пожаров на соседних участках:

- факельного горения;
- пожаров проливов горючих веществ на поверхность;
- пожаров твердых горючих веществ;
- сгорания газопаровоздушной смеси в открытом пространстве в детонационном или дефлаграционном режиме с образованием волн давления;
- сгорания газопаровоздушной смеси в открытом пространстве в режиме пожара-вспышки;
- реализации огненного шара;
- пожаров в помещениях зданий и сооружений.

4. Тип пожара из числа вышеперечисленных, возникающего на участке, в сторону которого происходит эскалация, определяется исходя из свойств горючих веществ и материалов (физико-химические и пожароопасные свойства, параметры, при которых вещества обращаются в технологическом процессе и т. д.), обра-

щающихся на данном участке, метеорологических условий, объемно-планировочных решений и конструктивных особенностей оборудования, зданий, сооружений и наружных установок, размещаемых на данном участке.

5. При определении условной вероятности перехода пожара на соседние участки необходимо учитывать следующие сопутствующие факторы инициирующего заданную стадию эскалации пожара, воздействие которых обуславливает угрозу распространения пожара:

- непосредственное воздействие открытого пламени, в том числе расширяющихся продуктов сгорания при реализации пожара-вспышки;

- тепловое излучение при факельном горении, пожарах проливов горючих веществ на поверхность, пожарах твердых горючих веществ и огненных шарах;

- избыточное давление и импульс волны давления при сгорании газопаровоздушной смеси;

- избыточное давление и импульс волны давления при разрыве сосуда (резервуара) в результате воздействия на него очага пожара;

- осколки, образующиеся при взрывном разрушении элементов технологического оборудования;

- распространение пожара на соседние участки по коммуникационным линиям (кабельные каналы, газоуравнительные системы, трубопроводы, производственная канализация и т. д.).

6. Условная вероятность перехода пожара на соседние участки  $P_{ЭСК}$  рассчитывается по формуле:

$$P_{ЭСК} = P_{кр} \cdot (1 - P_{эф}), \quad (9)$$

где  $P_{кр}$  – условная вероятность достижения опасными факторами инициирующего заданную стадию эскалации пожара критических значений, при которых происходит повреждение или разрушение зданий, сооружений, технологического оборудования наружных установок, располагаемых на соседних с местом

возникновения указанного пожара участках, и/или воспламенение, горючих веществ и материалов, обращающихся на соседних участках;

$P_{эф}$  – вероятность эффективной работы мероприятий по обеспечению пожарной безопасности, направленных на ограничение распространения пожара (системы пожаротушения и/или водяного орошения, водяные завесы, огнезащитные покрытия, огнепреграждающие устройства, системы сброса давления, защитные экраны и т. д.). При отсутствии данных условную вероятность эффективного срабатывания мероприятий по обеспечению пожарной безопасности допускается принимать равной нулю.

7. Условная вероятность  $P_{кр}$  для случая непосредственного воздействия открытого пламени на горючие вещества и материалы, обращающиеся на соседних участках, а также на располагаемые на соседних участках здания, сооружения, наружные установки и оборудование принимается равной единице.

8. Условная вероятность  $P_{кр}$  для случая распространения пожара на соседние участки по коммуникационным линиям также принимается равной единице при отсутствии огнепреграждающих устройств.

9. Условная вероятность  $P_{кр}$  для случая воздействия теплового излучения, инициирующего заданную стадию эскалации пожара, на технологическое оборудование, конструкции и горючие вещества и материалы, располагаемые на соседних участках, определяется соотношением:

$$P_{кр} = \begin{cases} 1, & \text{если } q \geq q_{кр}; \\ 0, & \text{если } q < q_{кр}, \end{cases} \quad (10)$$

где  $q$  – интенсивность теплового излучения на соседнем участке, кВт/м<sup>2</sup>;

$q_{кр}$  – критическая интенсивность теплового излучения для рассматриваемого вида оборудования или материала, кВт/м<sup>2</sup>.

Для случая воздействия пожара на горючие вещества и материалы, обращающиеся на соседних участках,  $q_{кр}$  – это кри-

тическая интенсивность теплового излучения, при которой возможно воспламенение указанных горючих веществ и материалов. Значение  $q_{кр}$  для этого случая принимаются на основе данных, приведенных в прил. 4 к «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» или табл. 17.

10. Для случая воздействия инициирующего пожара на располагаемое на соседних участках технологическое оборудование и металлические конструкции  $q_{кр}$  – это критическая интенсивность теплового излучения, при которой наступает потеря прочности металла. В этом случае  $q_{кр}$  определяется на основании результатов испытаний соответствующего оборудования и конструкций. При отсутствии данных допускается принимать  $q_{кр}$  для технологического оборудования и металлических конструкций равной  $15 \text{ кВт/м}^2$ .

11. Вероятность  $P_{кр}$  для случая воздействия волны избыточного давления на технологическое оборудование, располагаемое на соседних участках, определяется соотношением:

$$P_{кр} = \begin{cases} 1, & \text{если } \Delta P \geq \Delta P_{кр}; \\ 0, & \text{если } \Delta P < \Delta P_{кр}, \end{cases} \quad (11)$$

где  $\Delta P$  – избыточное давление волны давления, кПа,

$\Delta P_{кр}$  – критическое избыточное давление волны давления, кПа, при котором происходит разрушение технологического оборудования.

Величина  $\Delta P_{кр}$  определяется исходя из технологических, планировочных и конструктивных решений оборудования, данных об авариях со взрывами на аналогичных производствах. При отсутствии данных допускается принимать равным  $10 \text{ кПа}$ .

Вероятность  $P_{кр}$  для случая воздействия волны избыточного давления на здания и сооружения, располагаемые на соседних участках, определяется с помощью пробит-функции (см. п. 2.4).

В соответствии с «Методикой определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» условная вероятность эффективного срабатывания соответствующих средств предотвращения или локализации пожароопасной ситуации или пожара принимается исходя из статистических данных, публикуемых в научно-техническом журнале «Пожарная безопасность», или по паспортным данным завода-изготовителя оборудования.

При отсутствии указанных данных рекомендуемые сведения по условной вероятности эффективного срабатывания (выполнения задачи) некоторыми системами противопожарной защиты, необходимые для построения деревьев событий при возникновении и развитии пожароопасных ситуаций, приведены в табл. 11.

Таблица 11

Условная вероятность срабатывания систем противопожарной защиты

Система противопожарной защиты	Условная вероятность эффективного срабатывания
<i>1</i>	<i>2</i>
Системы противопожарной защиты при соблюдении в полном объеме требований нормативных документов по пожарной безопасности при проектировании, монтаже и эксплуатации: <ul style="list-style-type: none"> <li>– автоматические установки пожарной сигнализации;</li> <li>– автоматические установки пожаротушения или водяного орошения при наличии контроля за работоспособностью установки независимой организацией (вне зависимости от типа установки пожаротушения);</li> </ul>	<p style="text-align: center;">0,8</p> <p style="text-align: center;">0,95</p>

1	2
– автоматические установки водяного (пенного) пожаротушения или водяного орошения при отсутствии контроля за работоспособностью установки независимой организацией;	0,6
– остальные типы автоматических установок пожаротушения при отсутствии контроля за работоспособностью установки независимой организацией;	0,5
Системы противопожарной защиты при несоблюдении в полном объеме требований нормативных документов по пожарной безопасности при проектировании, монтаже и эксплуатации (при отсутствии данных предприятия-поставщика)	0

#### **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.

**Детерминированные критерии** показывают значения параметров опасных факторов, при которых наблюдается тот или иной уровень поражения людей при различных разрушениях окружающих зданий, сооружений и оборудования. В случае использования детерминированных критериев условная вероятность поражения принимается равной единице, если значение критерия превышает предельно допустимый уровень, и равной нулю, если значение критерия не превышает предельно допустимый уровень поражения людей или разрушения окружающих зданий, сооружений и оборудования.

**Вероятностные критерии** показывают, какова условная вероятность поражения людей или разрушения зданий, сооружений и оборудования при заданном значении опасного фактора пожара (например, избыточного давления или импульса положительной фазы ударной волны).

При оценке воздействия опасных факторов пожара или взрыва для различных сценариев их развития могут рассматриваться критерии как детерминированного, так и вероятностного характера (например, поражение ударной волной или тепловым излучением).

Детерминированные критерии поражения людей, в том числе находящихся в здании, избыточным давлением при сгорании газо-, паро- или пылевоздушных смесей в помещениях или на открытом пространстве согласно ГОСТ Р 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля» приведены в табл. 12.

Критическое избыточное давление для разрушения ударной волной тех или иных элементов зданий приведено в табл. 13, а повреждения некоторых строительных конструкций – в табл. 14.

Критическое избыточное давление ударной волны, при котором реализуется поражение органов слуха человека при сгорании газо-, паро- или пылевоздушных смесей в помещениях или на открытом пространстве, приведено в табл. 15.

Критическое избыточное давление ударной волны для людей, находящихся в зданиях, приведено в табл. 16.

Таблица 12

Предельно допустимое избыточное давление при сгорании газо-,  
паро- или пылевоздушных смесей в помещениях  
или на открытом пространстве

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 13

Критическое избыточное давление для повреждения элементов зданий  
ударной волной

Характер повреждений элементов зданий	Избыточное давление, кПа
<i>1</i>	<i>2</i>
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

<i>1</i>	<i>2</i>
деревянных каркасных зданий, кирпичных зданий со стенами в 1,5 кирпича, зданий с массивными стенами	28 40 100
Разрушение фундамента	215–400

Таблица 14

Характер повреждения промышленных конструкций  
в зависимости от избыточного давления ударной волны

Характер повреждений промышленных конструкций	Избыточное давление, кПа
<i>1</i>	<i>2</i>
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

Таблица 15

Эффект воздействия ударной волны на слуховой аппарат человека

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 16

Виды воздействия избыточного давления на людей, находящихся в зданиях

Вид воздействия	Давление воздействия, кПа
<i>1</i>	<i>2</i>
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

<i>1</i>	<i>2</i>
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 перепонок	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

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

Величины  $q_{CR}$  для воспламенения некоторых горючих материалов приведены в табл. 17.

Таблица 17

Критические параметры интенсивности теплового излучения, вызывающие воспламенение горючих материалов

Материалы	$q_{CR}$ , кВт/м <sup>2</sup>
<i>1</i>	<i>2</i>
Древесина (сосна влажностью 12 %)	13,9

1	2
Древесно-стружечные плиты (плотностью 417 кг/м <sup>3</sup> )	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

Интенсивность теплового излучения для различных сте-

пеней поражения человека при пожарах проливов ЛВЖ и ГЖ приведена в табл. 18, а при воздействии «огненного шара» – в табл. 19.

Таблица 18

Предельно допустимая интенсивность теплового излучения пожаров проливов ЛВЖ и ГЖ

Степень поражения	Интенсивность излучения, кВт/м <sup>2</sup>
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 19

Предельно допустимая доза теплового излучения при воздействии «огненного шара» на человека

Степень поражения	Доза теплового излучения, Дж/м <sup>2</sup>
Ожог 1-й степени	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Ожог 2-й степени	$2,2 \cdot 10^{-5}$
Ожог 3-й степени	$3,2 \cdot 10^{-5}$

Дозу теплового излучения  $Q$ , Дж/м<sup>2</sup>, определяют по формуле:

$$Q = q \cdot t_s, \quad (12)$$

где  $q$  – интенсивность теплового излучения «огненного шара», Вт/м<sup>2</sup>;

$t_s$  – время существования «огненного шара», с.

Детерминированные критерии поражения технологического оборудования и строительных конструкций определяются, как правило, из условий потери ими несущей способности.

Основным критерием потери несущей способности является достижение на необогреваемой поверхности (например, внутренней поверхности резервуара, вблизи которого находится очаг пожара) критической температуры. Некоторые данные о значениях критических температур строительных материалов приведены в табл. 20.

Таблица 20

Критические температуры, вызывающие потерю несущей способности строительных материалов

Материал	Критическая температура, °С
1	2
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

<i>1</i>	<i>2</i>
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

Оценка поражающего действия теплового излучения может быть проведена путем решения уравнения теплопроводности для облучаемого объекта (например, резервуара) с определением момента достижения температурой конструкционных материалов критических значений, приведенных в табл. 20.

Для приближенной оценки поражающего действия излучения можно использовать метод, основанный на оценке критических величин плотностей тепловых потоков, вызывающих нагрев конструкционных материалов до критических температур. При этом величины критических тепловых потоков могут определяться как экспериментальным, так и расчетным путем.

Имеются экспериментальные данные по минимальной плотности теплового потока  $q_{min}$ , при которой возможен прогрев труб до температур самовоспламенения типичных нефтепродуктов (табл. 21).

Таблица 21

Зависимость температуры самовоспламенения нефтепродуктов от плотности теплового потока и времени прогрева труб

Температура самовоспламенения, °C	$q_{min}$ (кВт/м <sup>2</sup> ) при времени прогрева (мин)			
	1	3	5	более 15
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
250	21,3	13,2	11,9	8,9
300	27,1	19,2	16,9	12,0

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
350	34,9	25,8	22,7	15,5
400	–	34,9	30,2	19,9
500 и выше	–	–	34,9	27,9

В технической литературе описан метод расчетно-амплитудного определения противопожарных разрывов между резервуарами с СУГ и ЛВЖ. Предполагается, что горение резервуара с ЛВЖ происходит во всем обваловании резервуара. В качестве критической температуры несмоченной стенки резервуара с СУГ принимается величина 427 °С. Расчеты показывают, что плотность падающего на стенки резервуара теплового потока не должна превышать 13,5 кВт/м<sup>2</sup> в отсутствии ветра и 22 кВт/м<sup>2</sup> при скорости ветра 10 м/с.

В случае полного охвата пламенем стенок резервуара представляется достаточным решение тепловой задачи в обыкновенных дифференциальных уравнениях с использованием критических температур из табл. 21. При асимметричном нагреве возможно использование критической плотности теплового потока  $q_{min}$ . Если решается задача о возможности переноса пламени от горящего резервуара к негорящему, может быть использована табл. 21. Если решается задача о разрушении несмоченной стенки резервуара, то величина  $q_{min}$  может быть принята приближенно равной 20 кВт/м<sup>2</sup>.

Вероятностный метод определяет случайный характер пожароопасных событий и учитывает вероятность возникновения той или иной аварийной ситуации на рассматриваемом технологическом объекте (установке, блоке), а также вероятности поражения человека и объектов инфраструктуры избыточным давлением и тепловым излучением при реализации этой аварийной ситуации.

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:

$$P_r = a + b \cdot \ln(S), \quad (13)$$

где  $a, b$  – константы, зависящие от степени поражения и вида объекта;

$S$  – интенсивность воздействующего фактора.

Соотношения между величиной  $P_r$  и условной вероятностью поражения человека приведены в табл. 22.

Таблица 22

Значения пробит-функции

Условная вероятность поражения, %	Величина $P_r$									
	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
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

При отсутствии в табл. 22 необходимых данных значения условной вероятности поражения человека  $Q_{дi}(a)$  в зависимости от значения пробит-функции определяются по формуле:

$$Q_{di}(a) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{P_r - 5} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) dU, \quad (14)$$

где  $U$  – линейная скорость распространения пламени, м/мин.

Частные случаи пробит-функций для определения вероятности поражения человека, разрушения зданий и сооружений при прохождении ударной волны приведены в табл. 23 и 24.

При оценке условной вероятности поражения человека ударной волной, находящегося на участке территории производственного объекта, на котором отсутствуют какие-либо здания, строения и сооружения, применяются значения пробит-функции и воздействующие факторы для безвозвратных потерь.

Таблица 23

Пробит-функции для определения вероятности смертельного поражения и вероятности получения ранения при взрыве (персонал вне зданий)

Вид потерь	Пробит-функция	Воздействующие факторы
Безвозвратные потери	$P_{r,2} = 5 - 5,74 \cdot \ln(S_2)$	$\begin{cases} S_2 = \frac{4,2}{I + P_s} + \frac{I_s}{I_s} \\ P_s = \frac{\Delta P_\phi}{P_o} \\ I_s = \frac{I}{P_o^{1/2} \cdot m^{1/3}} \end{cases}$
Общие потери (сумма безвозвратных и санитарных потерь)	$P_{r,3} = 5 - 2,44 \cdot \ln(S_3)$	$S_3 = \frac{7,38 \cdot 10^3}{\Delta P_\phi} + \frac{1,3 \cdot 10^9}{I \cdot \Delta P_\phi}$

*Примечание.*  $\Delta P_\phi$  – избыточное давление, Па;  
 $P_o$  – атмосферное давление, Па ( $P_o = 101325$  Па);  
 $I$  – импульс волны давления, Па·с;  
 $m$  – масса человека, кг (допускается принимать 70 кг).

Для оценки вероятности поражения людей, находящихся в селитебной зоне, а также на участках территории производственных объектов, характеризующихся наличием зданий, сооружений и строений, должны применяться формулы по определению тяжелых разрушений зданий.

Таблица 24

Пробит-функции для различных степеней разрушения зданий и сооружений при взрыве (персонал в зданиях)

Вид потерь	Пробит-функция	Воздействующие факторы
Слабые разрушения	$P_{r1} = 5 - 0,26 \cdot \ln(V_1)$	$V_1 = \left(\frac{4600}{\Delta P_\phi}\right)^{3,9} + \left(\frac{110}{I}\right)^{5,0}$
Тяжелые разрушения	$P_{r2} = 5 - 0,26 \cdot \ln(V_2)$	$V_2 = \left(\frac{17500}{\Delta P_\phi}\right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I}\right)^{9,3}$
Полные разрушения	$P_{r4} = 5 - 0,22 \cdot \ln(V_4)$	$V_4 = \left(\frac{40000}{\Delta P_\phi}\right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I}\right)^{11,3}$

При оценке условной вероятности поражения человека, находящегося в здании, следует также использовать пробит-функцию, определяемую по формулам для тяжелых разрушений зданий.

Для поражения человека тепловым излучением величина пробит-функции описывается формулой:

$$P_r = -128 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}), \quad (15)$$

где  $t$  – эффективное время экспозиции, с;  
 $q$  – интенсивность теплового излучения, кВт/м<sup>2</sup>.

Величина эффективного времени экспозиции  $t$  определяется по формулам:

– для «огненного шара»

$$t = 0,852 \cdot m^{0,26}, \quad (16)$$

– для пожара пролива

$$t = t_0 + \frac{x}{u}, \quad (17)$$

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 (зоны, где интенсивность теплового излучения меньше  $4 \text{ кВт/м}^2$ );

$u$  – средняя скорость движения человека к безопасной зоне, м/с (принимается равной  $5 \text{ м/с}$ ).

Для наружных установок, включающих в свой состав эстажки, открытые галереи, эстакады с проходами и площадками обслуживания, длина пути от места расположения человека до безопасной зоны определяется на основе объемно-планировочных решений наружной установки и предусмотренных на ней путей эвакуации. При этом длину пути следует определять как расстояние от наиболее удаленной точки рассматриваемой наружной установки до специально предусмотренной на наружной установке безопасной зоны (например, лестницы, защищенной огнезащитными экранами) или зоны на установке или вне ее пределов, где интенсивность теплового излучения меньше  $4 \text{ кВт/м}^2$ . Длина наклонных участков пути принимается по их проектному значению. Пандусы, если их наклон менее  $1:8$ , допускается относить к горизонтальным путям.

Условная вероятность поражения человека, попавшего в

зону непосредственного воздействия пламени пожара пролива или факела, принимается равной единице.

Для пожара-вспышки следует принимать, что условная вероятность поражения человека, попавшего в зону воздействия высокотемпературными продуктами сгорания газопаровоздушного облака, принимается равной единице, а за пределами этой зоны условная вероятность поражения человека – равной нулю.

Радиус воздействия высокотемпературных продуктов сгорания паровоздушного облака при пожаре-вспышке определяется приближенным соотношением:

$$R = X_L \cdot (E_i - I)^{1/3}, \quad (18)$$

где  $X_L$  – горизонтальный размер взрывоопасной зоны, м;  
 $E_i$  – объемный коэффициент расширения продуктов сгорания. Для нефтепродуктов может быть принят равным 7;

Значение пробит-функции для определения вероятности поражения людей при токсическом поражении, обусловленное воздействием ОФП на объекты с АХОВ или транспортировки указанных веществ трубопроводным транспортом, определяется по формуле:

$$Pr = a + b \cdot \ln(C_{ppm}^n \cdot \tau), \quad (19)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $n$  – константы для каждого конкретного аварийно химически опасного вещества (табл. 25),

$\tau$  – время воздействия, мин;

$C_{ppm}$  – концентрация вещества в конкретной точке зоны заражения, ppm, связанная с концентрацией вещества в мг/л соотношением:

$$C_{ppm} = 62360 \cdot C_{мг/л} \cdot \frac{(273,15 + t)}{M \cdot P}, \quad (20)$$

где  $t$  – температура воздуха, °С;

$M$  – молекулярная масса вещества, кг/кмоль;

$P$  – давление воздуха, мм рт. ст.

По расчетным значениям пробит-функций определяется вероятность смертельного поражения персонала  $P_{безв}$  (табл. 22).

Таблица 25

Параметры пробит-функции для случая смертельного токсического поражения

Вещество	a	b	n
Акролеин	-4,931	2,049	1
Акролонитрит	-24,42	3,008	1,43
Аммиак	-30,90	1,85	2
Бензол	-104,78	5,3	2
Бром	-4,04	0,92	2
Угарный газ	-32,98	3,7	1
Четыреххлористый углерод	-1,29	0,408	2,5
Хлор	-3,29	0,92	2
Формальдегид	-7,24	1,3	2
Соляная кислота	-16,85	2,0	1
Цианистоводородная кислота	-24,42	3,008	1,43
Фтористоводородная кислота	-30,87	3,354	1
Сероводород	-26,42	3,008	1,43
Бромистый метил	-50,81	5,27	1
Метилизоцианат	-0,642	1,637	0,653
Оксид азота	-8,79	1,4	2
Фосген	-14,27	3,686	1
Оксид пропилена	-2,415	0,509	2
Двуокись серы	-10,67	2,1	1
Толуол	-1,794	0,408	2,5

## 2.5. Анализ наличия систем пожарной безопасности зданий (объектов)

Под системой пожарной безопасности, согласно прил. 1 ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования», понимается комплекс организационных мероприятий и технических средств, направленных на предотвращение пожара и ущерба от него.

Объекты защиты должны иметь системы пожарной безопасности, направленные на предотвращение воздействия на людей опасных факторов пожара, в том числе их вторичных проявлений на требуемом уровне (рис. 6).



Рис. 6. Структурная схема систем пожарной безопасности

При анализе влияния систем обеспечения пожарной безопасности зданий на расчетные величины пожарного риска предусматривается рассмотрение комплекса мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объекта.

При этом рассматриваются следующие мероприятия по обеспечению пожарной безопасности:

- мероприятия, направленные на предотвращение пожара;

- мероприятия по противопожарной защите;
- организационно-технические мероприятия по обеспечению пожарной безопасности.

Система предотвращения пожара реализуется строгим исполнением инструкций о мерах пожарной безопасности, разработанных на предприятии, и выполнением режимных (ограничительных) мероприятий и достигается путем предотвращения условий образования горючей среды и(или) предотвращения в горючей среде источников зажигания или внесения их извне.

Состав и функциональные характеристики систем предотвращения пожаров на объекте защиты установлены Федеральным законом ФЗ № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», а состав и функциональные характеристики систем противопожарной защиты объектов – нормативными документами по пожарной безопасности.

Исключение условий образования горючей среды должно обеспечиваться одним или несколькими из следующих способов:

- применением негорючих веществ и материалов;
- ограничением массы и(или) объема горючих веществ и материалов;
- использованием наиболее безопасных способов размещения горючих веществ и материалов, а также материалов, взаимодействие которых друг с другом приводит к образованию горючей среды;
- изоляцией горючей среды от источников зажигания (применение изолированных отсеков, камер, кабин);
- поддержанием безопасной концентрации в среде окислителя и(или) горючих веществ;
- понижением концентрации окислителя в горючей среде в защищаемом объеме;
- поддержанием температуры и давления среды, при которых распространение пламени исключается;
- механизацией и автоматизацией технологических процессов, связанных с обращением горючих веществ;

- установкой пожароопасного оборудования в отдельных помещениях или на открытых площадках;
- применением устройств защиты производственного оборудования, исключающих выход горючих веществ в объем помещения, или устройств, исключающих образование в помещении горючей среды;
- удалением из помещений технологического оборудования и коммуникаций пожароопасных отходов производства, отложений пыли, пуха.

Исключение условий образования в горючей среде (или внесения в нее) источников зажигания должно достигаться одним или несколькими из следующих способов:

- применением электрооборудования, соответствующего классу пожароопасной и(или) взрывоопасной зоны, категории и группе взрывоопасной смеси;
- применением в конструкции быстродействующих средств защитного отключения электроустановок и других устройств, приводящих к появлению источников зажигания;
- применением оборудования и режимов проведения технологического процесса, исключающих образование статического электричества;
- устройством молниезащиты зданий, сооружений, строений и оборудования;
- поддержанием безопасной температуры нагрева веществ, материалов и поверхностей, которые контактируют с горючей средой;
- применением способов и устройств ограничения энергии искрового разряда в горючей среде до безопасных значений;
- применением искробезопасного инструмента при работе с легковоспламеняющимися жидкостями и горючими газами;
- ликвидацией условий для теплового, химического и (или) микробиологического самовозгорания обращающихся веществ, материалов и изделий;
- исключением контакта с воздухом пиррофорных веществ;

– применением устройств, исключающих возможность распространения пламени из одного объема в смежный.

Безопасные значения параметров источников зажигания определяются условиями проведения технологического процесса на основании показателей пожарной опасности обращающихся в нем веществ и материалов.

Защита людей и имущества от воздействия опасных факторов пожара и(или) ограничение его последствий обеспечиваются снижением динамики нарастания опасных факторов пожара, эвакуацией людей и имущества в безопасную зону и(или) тушением пожара.

Защита людей и имущества от воздействия опасных факторов пожара и(или) ограничение последствий их воздействия обеспечиваются одним или несколькими из следующих способов:

– применением объемно-планировочных решений и средств, обеспечивающих ограничение распространения пожара за пределы очага;

– устройством эвакуационных путей, удовлетворяющих требованиям безопасной эвакуации людей при пожаре;

– устройством систем обнаружения пожара (установок и систем пожарной сигнализации), оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре;

– применением систем коллективной защиты (в том числе противодымной) и средств индивидуальной защиты людей от воздействия опасных факторов пожара;

– применением основных строительных конструкций с пределами огнестойкости и классами пожарной опасности, соответствующими требуемой степени огнестойкости и классу конструктивной пожарной опасности зданий, сооружений и строений, а также с ограничением пожарной опасности поверхностных слоев (отделок, облицовок и средств огнезащиты) строительных конструкций на путях эвакуации;

– применением огнезащитных составов (в том числе антипиренов и огнезащитных красок) и строительных материалов (облицовок) для повышения пределов огнестойкости строительных конструкций;

- устройством аварийного слива пожароопасных жидкостей и аварийного стравливания горючих газов из аппаратуры;
- устройством на технологическом оборудовании систем противовзрывной защиты;
- применением первичных средств пожаротушения;
- применением автоматических установок пожаротушения;
- организацией деятельности подразделений пожарной охраны.

Ограничение распространения пожара за пределы очага должно обеспечиваться:

- устройством противопожарных преград;
- установлением предельно допустимых площадей противопожарных отсеков и секций, ограничением этажности;
- устройством аварийного отключения и переключения установок и коммуникаций;
- применением средств, предотвращающих или ограничивающих разлив и растекание жидкости при пожаре;
- применением огнепреграждающих устройств и оборудования.

На каждом объекте должно быть обеспечено своевременное оповещение людей и(или) сигнализация о пожаре в его начальной стадии техническими или организационными средствами. Перечень и обоснование достаточности для целевой эффективности средств оповещения и(или) сигнализации на объектах согласовываются в установленном порядке.

В зданиях и сооружениях необходимо предусмотреть технические средства (лестничные клетки, противопожарные стены, лифты, наружные пожарные лестницы, аварийные люки и т. п.), имеющие устойчивость при пожаре и огнестойкость конструкций не менее времени, необходимого для спасения людей при пожаре и расчетного времени тушения пожара.

Организационно-технические мероприятия должны включать:

- разработку и реализацию норм и правил пожарной безопасности, инструкций о порядке работы с пожароопасными

веществами и материалами, о соблюдении противопожарного режима и о действиях людей при возникновении пожара;

- разработку мероприятий по действиям администрации, рабочих, служащих на случай возникновения пожара и организации эвакуации людей;

- изготовление и применение средств наглядной агитации по обеспечению пожарной безопасности.

Мероприятия по обеспечению пожарной безопасности учитываются при определении частот пожароопасных ситуаций, возможных сценариев возникновения и развития пожаров и последствий воздействия опасных факторов пожара на людей для различных сценариев его развития.

### 3. ПОРЯДОК ВЫЧИСЛЕНИЯ ВЕЛИЧИН ПОЖАРНОГО РИСКА НА ОБЪЕКТЕ

Расчет значений индивидуального и социального пожарных рисков для зданий (частей зданий – пожарных отсеков), сооружений и строений, а также для территории производственных объектов и прилегающей к объекту территории следует проводить по изложенному в «Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» порядку, используя в качестве промежуточной величины значения потенциального пожарного риска для территории и зданий объекта.

Риск индивидуальный – частота поражения отдельного человека в результате воздействия всей совокупности исследуемых факторов опасности в рассматриваемой точке пространства.

Риск социальный – зависимость между частотой реализации определенных факторов опасностей и размером последствий для здоровья людей.

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

Величина потенциального пожарного риска  $P(a)$  ( $\text{год}^{-1}$ ) (далее – потенциального риска) в определенной точке ( $a$ ) как на территории производственного объекта, так и на прилегающей к объекту территории определяется с помощью выражения:

$$P(a) = \sum_{j=1}^J Q_{dj}(a) Q_j, \quad (21)$$

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<sup>-1</sup>.

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 и 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:

$$Q_{dj}(a) = 1 - \prod_{k=1}^h (1 - Q_k Q_{dk}(a)), \quad (22)$$

где  $h$  – число рассматриваемых опасных факторов;

$Q_k$  – вероятность реализации  $k$ -го опасного фактора;

$Q_{dk}(a)$  – условная вероятность поражения  $k$ -м опасным фактором.

Результаты расчетов потенциального риска отображаются на карте (ситуационном и генеральном плане) производственного объекта 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.

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

### 3.2. Потенциальный риск в зданиях объекта

Величина потенциального риска  $P_i$  (год<sup>-1</sup>) в  $i$ -м помещении здания определяется по формуле:

$$P_i = \sum_{j=1}^J Q_j Q_{dij}, \quad (23)$$

где  $J$  – число сценариев возникновения пожара в здании;

$Q_j$  – частота реализации в течение года  $j$ -го сценария пожара, год<sup>-1</sup>;

$Q_{dij}$  – условная вероятность поражения человека при его

нахождении в  $i$ -м помещении при реализации  $j$ -го сценария пожара.

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

$$Q_{dij} = (1 - P_{Эij}) \cdot (1 - D_{ij}), \quad (24)$$

где  $P_{Эij}$  – вероятность эвакуации людей, находящихся в  $i$ -м помещении здания, при реализации  $j$ -го сценария пожара;

$D_{ij}$  – вероятность эффективной работы технических средств по обеспечению безопасности людей в  $i$ -м помещении при реализации  $j$ -го сценария пожара.

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

$$P_{Эij} = 1 - (1 - P_{Э.Пij}) \cdot (1 - P_{Д.Вij}), \quad (25)$$

где  $P_{Э.Пij}$  – вероятность эвакуации людей, находящихся в  $i$ -м помещении здания, по эвакуационным путям при реализации  $j$ -го сценария пожара;

$P_{Д.Вij}$  – вероятность покидания здания людьми, находящимися в  $i$ -м помещении, через аварийные выходы или с помощью иных средств спасения.

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

Вероятность эвакуации по эвакуационным путям  $P_{Э.Пij}$  рассчитывают по формуле:

$$P_{Э.Пij} = \begin{cases} \frac{0,8 \cdot \tau_{бlij} - t_{Pij}}{\tau_{H.Э}}, & \text{если } t_{Pij} < 0,8 \cdot \tau_{бlij} < t_{Pij} + \tau_{H.Эij}; \\ 0,999, & \text{если } t_{Pij} + \tau_{H.Эij} \leq 0,8 \cdot \tau_{бlij}; \\ 0, & \text{если } t_{Pij} \geq 0,8 \cdot \tau_{бlij}, \end{cases} \quad (26)$$

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  $j$ -м сценарии пожара, мин;

$\tau_{H,\text{Э}ij}$  – 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  $\tau_{H,\text{Э}}$  для зданий (сооружений) без систем оповещения рассчитывают по результатам исследования поведения людей при пожарах в зданиях конкретного назначения.

При наличии в здании системы оповещения людей о пожаре и управления эвакуацией людей в зданиях (СОУЭ)  $\tau_{H,\text{Э}}$  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  $\tau_{H,\text{Э}}$  допускается принимать равным 0,5 мин – для этажа пожара и 2 мин – для вышележащих этажей.

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

В этом случае вероятность  $P_{\text{Э},\text{П}ij}$  вычисляется по формуле:

$$P_{\text{Э},\text{П}ij} = \begin{cases} 0,999, & \text{если } t_{Pij} < 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij}; \\ 0, & \text{если } t_{Pij} \geq 0,8 \cdot \tau_{\text{бл}ij}. \end{cases} \quad (27)$$

Величины  $\tau_{\text{бл}ij}$  и  $t_{Pij}$  рассчитываются по методам, изложенным ниже.

Расчетное время эвакуации  $t_{Pij}$  рассчитывается при максимально возможной расчетной численности людей в здании, оп-

ределяемой 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.

Для определения указанных выше величин  $\tau_{0lij}$  и  $t_{pij}$  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.

При определении величин потенциального риска для работников, которые находятся в здании на территории производственного объекта, допускается рассматривать для здания 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:

$$D_{ij} = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - D_{ijk}), \quad (28)$$

где  $K$  – число технических средств противопожарной защиты;

$D_{ijk}$  – вероятность эффективного срабатывания (выполнения задачи)  $k$ -го технического средства при  $j$ -м 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  $i$ -м 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 систем автоматического газового пожаротушения, установок порошкового и аэрозольного пожаротушения, а также комбинированных установок, использующих указанные огнетушащие вещества).

### **3.3. Индивидуальный пожарный риск в зданиях и на территории объекта**

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<sup>-1</sup>) для работника  $m$  производственного объекта при его нахождении на территории объекта определяется с помощью соотношения:

$$R_m = \sum_{i=1}^I q_{im} \cdot P(i), \quad (29)$$

где  $P(i)$  – величина потенциального риска в  $i$ -й области территории объекта, год<sup>-1</sup>;

$q_{im}$  – вероятность присутствия работника  $m$  в  $i$ -й области территории объекта.

Величина индивидуального риска  $R_m$  (год<sup>-1</sup>) для работника  $m$  при его нахождении в здании производственного объекта, обусловленная опасностью пожаров в здании, определяется по выражению:

$$R_m = \sum_{i=1}^N P_i \cdot q_{im}, \quad (30)$$

где  $P_i$  – величина потенциального риска в  $i$ -м помещении здания, год<sup>-1</sup>;

$q_{im}$  – вероятность присутствия работника  $m$  в  $i$ -м 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 (29) и (30).

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

#### **3.4. 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 (21), с учетом доли времени присутствия людей в зданиях, сооружениях и строениях вблизи производственного объекта. Для зданий, сооружений и строений классов Ф1 по функциональной пожарной опасности доля времени присутствия людей в зданиях принимается равной единице. Доля времени присутствия людей в зданиях, сооружениях и строениях классов Ф2, Ф3, Ф4 и Ф5 по функциональной пожарной опасности с круглосуточным режимом работы принимается равной единице, а при некруглосуточном режиме работы – в соответствии с организационно-распределительными документами для этих зданий, строений и сооружений.

Для производственных объектов социальный пожарный риск (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 производственного объекта, социальный риск  $S$  (год<sup>-1</sup>) определяется по формуле:

$$S = \sum_{j=1}^L Q_j, \quad (31)$$

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:

$$N_i = \sum_{i=1}^I Q_{dij} \cdot n_i, \quad (32)$$

где  $I$  – количество областей, на которые разделена территория, прилегающая к производственному объекту ( $i$  – номер области);

$Q_{dij}$  – условная вероятность поражения человека, находящегося в  $i$ -й области, опасными факторами при реализации  $j$ -го сценария;

$n_i$  – среднее число людей, находящихся в  $i$ -й области.

### **3.5. Потенциальный, индивидуальный и социальный пожарный риск для линейной части магистральных трубопроводов**

Величина потенциального риска  $P(r)$  ( $\text{год}^{-1}$ ) в определенной точке на расстоянии  $r$  от оси магистрального трубопровода определяется по формуле:

$$P(r) = \sum_{j=1}^{J_0} \sum_{k=1}^{K_0} \lambda_j(m) Q_{jk} \int_{x_{1jk}}^{x_{2jk}} Q_{нопjk}(x, r) dx, \quad (33)$$

где  $\lambda_j(m)$  – удельная частота разгерметизации линейной части

магистрального трубопровода для  $j$ -го типа разгерметизации на участке  $m$  магистрального трубопровода,  $\text{год}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ;

$K_0$  – число сценариев развития пожароопасной ситуации и/или пожара. При этом в общем случае подлежат рассмотрению для каждого типа разгерметизации следующие сценарии: факельное горение, пожар пролива (для истечения жидкой фазы), пожар-вспышка, сгорание газопаровоздушной смеси в открытом пространстве;

$J_0$  – число рассматриваемых типов разгерметизации;

$Q_{jk}$  – условная вероятность реализации  $k$ -го сценария развития пожароопасной ситуации (пожара) для  $j$ -го типа разгерметизации;

$Q_{нопjk}(x, r)$  – условная вероятность поражения человека в рассматриваемой точке на расстоянии  $r$  от оси магистрального трубопровода в результате реализации  $k$ -го сценария развития пожароопасной ситуации (пожара), произошедшей на участке магистрального трубопровода с координатой  $x$ , расположенной в пределах участка влияния  $k$ -го сценария развития пожара для  $j$ -го типа разгерметизации;

$x_{1jk}, x_{2jk}$  – координаты начала и окончания участка влияния.

Границы участка влияния определяются для  $k$ -го сценария развития пожароопасной ситуации (пожара) из условия, что зона поражения опасными факторами пожара (взрыва) при аварии на магистральном трубопроводе за пределами этого участка не достигает рассматриваемой точки на расстоянии  $r$  от оси магистрального трубопровода. Допускается проводить интегрирование по всей длине трубопровода.

Рекомендуемый метод определения удельных частот различных типов разгерметизации магистрального трубопровода приведен в параграфе 2.2.

Число рассматриваемых сценариев развития пожароопасной ситуации (пожара) при разгерметизации линейной части магистрального трубопровода, условные вероятности  $Q_{jk}$  и  $Q_{нопjk}(x, r)$  определяются в зависимости от специфики пожарной опасности магистрального трубопровода и транспортируемого вещества.

*Индивидуальный риск для работников, обслуживающих линейную часть магистрального трубопровода, определяется в соответствии с положениями, изложенными в параграфе 3.3 по выражениям (29) и (30).*

Для людей, находящихся в селитебной зоне вблизи линейной части магистрального трубопровода, индивидуальный риск определяется по формуле (21).

*Для людей, находящихся в селитебной зоне вблизи линейной части магистрального трубопровода, социальный риск  $S$  (год<sup>-1</sup>) определяется по формуле:*

$$S = \max\{S_1, S_2, \dots, S_p, \dots, S_Q\} \quad (34)$$

где  $S_1, S_2, S_p, S_Q$  – величины социального риска для различных потенциально опасных участков линейной части магистрального трубопровода, год<sup>-1</sup>, определяемые в соответствии с положениями, изложенными в параграфе 3.4 по выражениям (31) и (32);

$Q$  – количество потенциально опасных участков линейной части магистрального трубопровода.

Количество потенциально опасных участков линейной части магистрального трубопровода определяется на основе анализа плана трассы магистрального трубопровода и прилегающей к ней территории. Границы потенциально опасных участков линейной части магистрального трубопровода определяются из условия расположения вблизи них населенных пунктов, зданий, сооружений и строений, не относящихся к магистральному трубопроводу, расположенных на расстоянии менее значений, регламентированных нормативными документами по пожарной безопасности.

В соответствии со СНиП 2.05.06-85 «Магистральные трубопроводы» они классифицируются на газопроводы, нефтепроводы и нефтепродуктопроводы и классы в зависимости от рабочего давления и диаметра трубопровода.

Магистральные газопроводы подразделяются на два класса:

- I – при рабочем давлении свыше 2,5 до 10,0 МПа (свы-

ше 25 до 100 кгс/см<sup>2</sup>) включительно;

– II – при рабочем давлении свыше 1,2 до 2,5 МПа (свыше 12 до 25 кгс/см<sup>2</sup>) включительно.

Магистральные нефтепроводы и нефтепродуктопроводы подразделяются на четыре класса в зависимости от диаметра трубопровода, мм:

– I – при условном диаметре свыше 1000 до 1200 включительно;

– II – при условном диаметре свыше 500 до 1000 включительно;

– III – при условном диаметре свыше 300 до 500 включительно;

– IV – при условном диаметре 300 и менее.

Стандартом (СНиП 2.05.06-85 «Магистральные трубопроводы») установлены минимальные безопасные расстояния  $R_{СНИП}$  (МБР) от газопроводов, компрессорных станций (КС) и газораспределительных станций (ГРС) до населенных пунктов, промышленных и сельскохозяйственных объектов, зданий, авто- и железных дорог, ЛЭП аэродромов и других сооружений, лесных массивов. Значения МБР зависят от класса и диаметра газопровода, а также от социальной значимости перечисленных объектов и возможности каскадного развития аварий, возникающих на газопроводах, КС, ГРС или на этих объектах. В табл. 26 приведены значения  $R_{СНИП}$  для газопроводов I класса различных диаметров и соответствующих им КС и ГРС.

Таблица 26

Минимальные безопасные расстояния от газопроводов, КС, ГРС

Диаметр газопровода I класса, мм	300 и менее	Свыше 300 до 600 вкл.	Свыше 600 до 800 вкл.	Свыше 800 до 1000 вкл.	Свыше 1000 до 1200 вкл.	Свыше 1200 до 1400 вкл.
$R_{СНИП}$ , м от газопровода I класса	100	150	200	250	300	350

R <sub>СНИП</sub> , м от КС	500	500	700	700	700	700
R <sub>СНИП</sub> , м от ГРС	150	175	200	250	300	350

Расстояния от оси подземных и наземных нефтепроводов до населенных пунктов, отдельных промышленных и сельскохозяйственных предприятий, зданий с массовым пребыванием людей, жилых 3-этажных зданий и выше, АЗС, складов ЛВЖ, ГЖ и ГГ с объемом хранения свыше 1000 м<sup>3</sup> приведены в табл. 27.

Таблица 27

Минимальные расстояния, от оси нефтепроводов  
и нефтепродуктопроводов, м

Условный диаметр, мм	Класс			
	IV	III	II	I
	300 и менее	свыше 300 до 600 вкл.	свыше 600 до 800 вкл.	свыше 800 до 1000 вкл.
Расстояние, м	75	100	150	200

Конкретный перечень объектов, зданий и сооружений с регламентированными расстояниями для них от газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов, КС, ГРС, нефтеперекачивающих станций (НПС) приведены в табл. 4 и 5 (см. СНиП 2.05.06-85 «Магистральные трубопроводы»).

## 4. МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ОПАСНЫХ ФАКТОРОВ АВАРИЙ С ПОЖАРАМИ И ВЗРЫВАМИ

Оценка опасных факторов, реализующихся при сценариях аварий с пожарами на объектах экономики с наличием ГГ, ЛВЖ и ГЖ, основана на современных отечественных и зарубежных теоретических и экспериментальных данных, нормативных документах и руководствах.

### 4.1. Истечение жидкости и газов из резервуаров при различных сценариях их разрушения

#### 4.1.1. Истечение жидкости

Рассматривается резервуар, находящийся в обваловании (рис. 7).

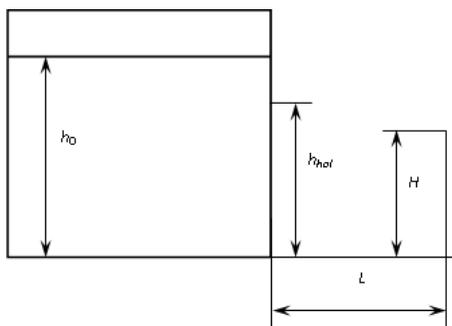


Рис. 7. Схема для расчета истечения жидкости из отверстия в резервуаре

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) описывается соотношением:

$$G(t) = G_0 \frac{\rho \cdot g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2}{A_R} \cdot t, \quad (35)$$

где  $G_0$  – массовый расход в начальный момент времени, кг/с, определяется по выражению:

$$G_0 = \mu \cdot \rho \cdot A_{hol} \cdot \sqrt{2g \cdot (h_0 - h_{hol})}, \quad (36)$$

- где  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  
 $g$  – ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>);  
 $\mu$  – коэффициент истечения;  
 $A_{hol}$  – площадь отверстия, м<sup>2</sup>;  
 $h_{hol}$  – высота расположения отверстия, м;  
 $A_R$  – площадь сечения резервуара, м<sup>2</sup>;  
 $h_0$  – начальная высота столба жидкости в резервуаре, м.

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

$$h(t) = h_0 - \frac{G_0}{\rho \cdot A_R} \cdot t + \frac{g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2 \cdot t^2}{2 \cdot A_R^2}. \quad (37)$$

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

$$h_{hol} \geq H + \frac{L}{\mu}, \quad (38)$$

- где  $H$  – высота обвалования, м;  
 $L$  – расстояние от стенки резервуара до обвалования, м.  
 Количество жидкости  $m$  (кг), перелившейся через обвало-

вание за полное время истечения, определяется по выражению:

$$m = \int_0^{t_{pour}} G(t) dt = G_0 \cdot t_{pour} - \frac{\rho \cdot g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2}{2A_R} \cdot t_{pour}^2, \quad (39)$$

где  $t_{pour}$  – время, в течение которого жидкость переливается через обвалование, с (т. е. время, в течение которого выполняется условие (38)).

Величина  $t_{pour}$  определяется по выражению:

$$t_{pour} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (40)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – параметры, определяется по формулам:

$$a = g \cdot \mu^2 \cdot A_{hol}^2 / (2A_R^2), \text{ м/с}^2; \quad (41)$$

$$b = -\frac{G_0}{\rho \cdot A_R}, \text{ м/с}; \quad (42)$$

$$c = h_0 - H - \frac{L}{\mu}, \text{ м}. \quad (43)$$

В случае если жидкость в резервуаре находится под избыточным давлением  $\Delta P$  (Па), величина мгновенного массового расхода  $G_0$  (кг/с) определяется по выражению:

$$G_0 = \mu \cdot \rho \cdot A_{hol} \sqrt{2\Delta P / \rho + 2g(h_0 - h_{hol})}. \quad (44)$$

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

### 4.1.2. Истечение сжатого газа

При решении задач, связанных с истечением газов через сопло (отверстие) чаще всего приходится определять массовую скорость движения газа, вышедшего из сопла. Для этого необходимо, прежде всего, знать отношение давлений среды на выходе из сопла ( $P_a$ ) и на входе в него ( $P_v$ ), т. е.  $\beta = \frac{P_a}{P_v}$ . Найденное значение  $\beta$  сравнивают с так называемым критическим отношением давлений, которое определяется из уравнения:

$$\beta_{кр} = \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}, \quad (45)$$

При  $\beta \geq \beta_{кр}$  истечение газа называется докритическим, а при  $\beta < \beta_{кр}$  – сверхкритическим.

Если адиабатное истечение газа характеризуется  $\beta \geq \beta_{кр}$ , т. е.  $\frac{P_a}{P_v} \geq \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$ , то массовую скорость истечения сжатого газа из резервуара находят по выражению:

$$G = A_{hol} \mu \left[ P_v \rho_v \cdot \left( \frac{2\gamma}{\gamma - 1} \right) \cdot \left( \frac{P_a}{P_v} \right)^{2/\gamma} \cdot \left\{ 1 - \left( \frac{P_a}{P_v} \right)^{(\gamma - 1)/\gamma} \right\} \right]^{1/2}. \quad (46)$$

Если адиабатное истечение газа характеризуется  $\beta < \beta_{кр}$ , т. е.  $\frac{P_a}{P_v} < \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$ , то массовую скорость истечения сжатого газа из резервуара находят по выражению:

$$G = A_{hol} \mu \left[ P_V \rho_V \cdot \gamma \cdot \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{(\gamma + 1)/(\gamma - 1)} \right]^{1/2}, \quad (47)$$

где  $G$  – массовый расход, кг/с;  
 $P_a$  – атмосферное давление, Па;  
 $P_V$  – давление газа в резервуаре, Па;  
 $\gamma$  – показатель адиабаты газа;  
 $A_{hol}$  – площадь отверстия, м<sup>2</sup>;  
 $\mu$  – коэффициент истечения (0,6–0,8);  
 $\rho_V$  – плотность газа в резервуаре при давлении  $P_V$ , кг/м<sup>3</sup>.

### 4.1.3. Истечение сжиженного газа из отверстия в резервуаре

Массовая скорость истечения паровой фазы  $G_V$  (кг/с) описывается формулой:

$$G_V = \mu \cdot A_{hol} \sqrt{\left( \frac{P_C M}{RT_C} \right) \cdot P_C \cdot (0,167 P_R^5 + 0,534 P_R^{1,95})}, \quad (48)$$

где  $\mu$  – коэффициент истечения;  
 $A_{hol}$  – площадь отверстия, м<sup>2</sup>;  
 $P_C$  – 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 (45)–(47).

Массовая скорость истечения жидкой фазы  $G_L$  (кг/с) опи-

сывается формулой:

$$G_L = G_V \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{\rho_L}{\rho_V}\right)^{P_R}}}{(1,22 \cdot T_R^{3/2})}, \quad (49)$$

где  $\rho_L$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_V$  – плотность паровой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  
 $T_R = T/T_C$  – безразмерная температура сжиженного газа;  
 $T$  – температура сжиженного газа в резервуаре, К.

#### 4.1.4. Растекание жидкости при квазимгновенном разрушении резервуара

Под квазимгновенном разрушением резервуара следует понимать внезапный (в течение 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:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot [(h - h_G)u] = 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left( \frac{u^2}{2} + gh \right) = 0 \end{cases}, \quad (50)$$

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 м/с<sup>2</sup>).

Граничные условия с учетом геометрии задачи (рис. 8) имеют вид:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \quad (51)$$

$$u|_{x=0} = 0; \quad (52)$$

$$\left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=b} = 0; \quad (53)$$

$$u|_{x=b} = \begin{cases} g^{1/2}(h-a)^{3/2}/h, & \text{если } h > a; \\ 0, & \text{если } h \leq a, \end{cases} \quad (54)$$

где  $a$  – высота обвалования.

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

$$Q = 100 \cdot \frac{\int_0^T u_N (h_N - a) dt}{h_0 \cdot R}, \quad (55)$$

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.

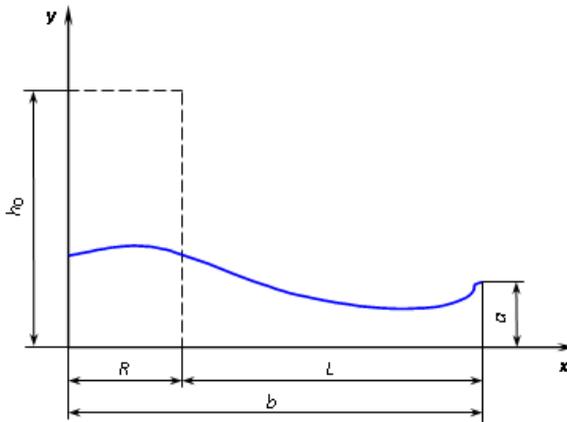


Рис. 8. Типичная картина движения жидкости в обваловании при квазимгновенном разрушении резервуара:

- – уровень начального столба жидкости;
- — — — — – уровень жидкости в промежуточный момент времени (результаты расчета)

График расчетной и экспериментальной зависимостей массовой доли перелившейся через обвалование жидкости  $Q$  от параметра  $a/h_0$  представлен на рис. 9.

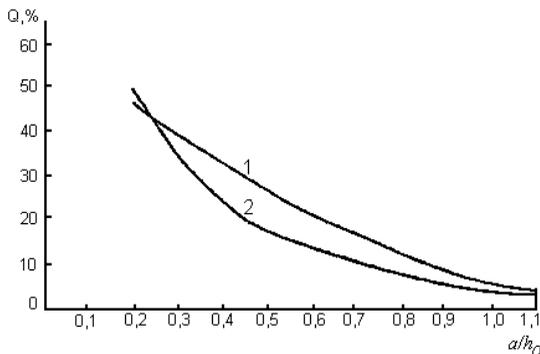


Рис. 9. Зависимость доли перелившейся через обвалование жидкости  $Q$  от параметра  $a/h_0$ :  
1 – расчет; 2 – эксперимент

График, изображенный на рис. 9, может быть использован для практических целей.

Масса перелившейся через обвалование жидкости может быть определена также по выражению:

$$\frac{M_p}{M_0} = 0,35 \cdot \left[ 0,9 + \left( \frac{R}{L} \right)^2 - \frac{a}{h_0} \right]^3, \quad (56)$$

где  $M_p$  и  $M_0$  – соответственно масса перелившейся и пролитой жидкости, кг.

## 4.2. Количественная оценка массы горючих веществ, поступающих в окружающее пространство в результате возникновения пожароопасных ситуаций

### 4.2.1. Предпосылки, положенные в основу количественной оценки массы горючих веществ

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.

При отсутствии данных допускается расчетное время отключения технологических трубопроводов принимать равным:

- времени срабатывания системы автоматики отключения трубопроводов согласно паспортным данным установки, если вероятность отказа системы автоматики не превышает 0,000001 в год или обеспечено резервирование ее элементов;

- 120 с, если вероятность отказа системы автоматики превышает 0,000001 в год и не обеспечено резервирование ее элементов;

- 300 с при ручном отключении;

г) в качестве расчетной температуры при пожароопасной ситуации с наземно расположенным оборудованием допускается принимать максимально возможную температуру воздуха в соответствующей климатической зоне, а при пожароопасной ситуации с подземно расположенным 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 небольших проливов жидкости (до 20 кг) время испарения допускается принимать равным 900 с;

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

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

Ниже приводятся основные расчетные формулы для определения масс горючих веществ, поступающих в открытое или замкнутое пространство в результате пожароопасных ситуаций.

#### **4.2.2. Разгерметизация надземного резервуара**

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

$$m_a = \rho_L \cdot V_R, \quad (57)$$

где  $m_a$  – масса жидкости, кг;

$\rho_L$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$V_R$  – объем жидкости в резервуаре, м<sup>3</sup>.

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

$$m_a = G_L \cdot \tau + \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2 \cdot \left( \sum_{i=1}^n L_i \right) \cdot \rho_L, \quad (58)$$

$$G_L = \mu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_p^2 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_L \cdot \Delta P_R}, \quad (59)$$

$$\Delta P_R = h_L \cdot \rho_L \cdot g, \quad (60)$$

где  $G_L$  – начальный расход жидкости, истекающей из резервуара через разгерметизированный трубопровод, кг/с;

$\mu$  – коэффициент истечения;

$\tau$  – 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;

$\Delta P_R$  – 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<sup>2</sup> ( $g = 9,81$ ).

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

$$F_{ПП} = f_P V_{Ж}, \quad (61)$$

где  $f_P$  – коэффициент разлития, м<sup>-1</sup> (при отсутствии данных

допускается принимать равным  $5 \text{ м}^{-1}$  при проливе на неспланированную грунтовую поверхность,  $20 \text{ м}^{-1}$  – при проливе на спланированное грунтовое покрытие,  $150 \text{ м}^{-1}$  – при проливе на бетонное или асфальтовое покрытие). В системе СИ коэффициент разлива выражается в  $\text{м}^2/\text{м}^3$  или  $\text{м}^{-1}$  и показывает значение площади разлива единицы объема данной жидкости;

$V_{ж}$  – объем жидкости, поступившей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара,  $\text{м}^3$ .

При крупномасштабных авариях, например, связанных с полным разрушением наземных вертикальных стальных резервуаров, коэффициент разлива, согласно «Рекомендациям по обеспечению пожарной безопасности объектов нефтепродуктообеспечения, расположенных на селитебной территории», определяют исходя из расположения наземного резервуара на местности:

$f_p = 12$  – при расположении на возвышенности;

$f_p = 5$  – при расположении на поверхности, имеющей уклон, благоприятствующий разливу жидкости, но не более 1 %.

Толщину слоя разлившейся жидкости  $\delta_{жс}$  определяют по выражению:

$$\delta_{жс} = 1 / f_p, \quad (62)$$

#### 4.2.3. Масса паров ЛВЖ, выходящих через дыхательную арматуру

В случае наполнения резервуара массу паров, выходящих через дыхательную арматуру, определяют по формуле:

$$m_V = \rho_V \cdot V_R \cdot P_S / P_0, \quad (63)$$

$$\rho_V = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_0)}, \quad (64)$$

где  $m_V$  – масса выходящих паров ЛВЖ, кг;

$\rho_V$  – плотность паров ЛВЖ, кг/м<sup>3</sup>;

$P_S$  – 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, м<sup>3</sup>;

$M$  – молярная масса паров ЛВЖ, кг/кмоль;

$V_0$  – мольный объем, равный 22,413 м<sup>3</sup>/кмоль;

$t_0$  – расчетная температура, °С.

При отсутствии справочных данных допускается рассчитывать  $P_S$  по выражению:

$$P_S = 10^{\left( A - \frac{B}{C_a + t_0} \right)}, \quad (65)$$

где  $A, B, C_a$  – константы уравнения Антуана.

Плотность паров ЛВЖ ( $\rho_V$ , кг/м<sup>3</sup>) можно определять по следующей зависимости:

$$\rho_V = 12,15 \cdot M / T, \quad (66)$$

где  $M$  – молярная масса, кг·кмоль<sup>-1</sup>;

$T$  – расчетная температура, К.

#### 4.2.4. Масса паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности

Массу паров ЛВЖ при испарении с открытой поверхности аппаратов (ванны для окраски окупанием, ванны для промывки и обезжиривания деталей растворителями, аварийный разлив) в неподвижную среду можно определить по выражению:

$$m = 2 \cdot \varphi_S \cdot F \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{D \cdot \tau}{3 \cdot (1 - \varphi_S)}}, \quad (67)$$

где  $m$  – масса испарившихся паров, кг;  
 $\varphi_s$  – концентрация насыщенных паров при рабочей температуре, об. доля;

$F$  – площадь испарения,  $\text{м}^2$ ;

$\rho$  – плотность паров жидкости,  $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ;

$D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;

$\tau$  – время испарения, с.

Движущей силой процесса при испарении в неподвижную среду является молекулярная диффузия.

Испарение в подвижную среду определяется законами массообмена. Для расчета количества испарившихся паров в подвижную среду на практике используются эмпирические зависимости.

Интенсивность испарения в движущуюся среду ( $J$ ,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}$ ) может быть определена по выражению:

$$J = F \cdot P_s \cdot M \cdot (0,734 + 1,637 \cdot \omega) \cdot 10^{-9}, \quad (68)$$

где  $F$  – площадь испарения,  $\text{м}^2$ ;

$P_s$  – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости, Па;

$M$  – молярная масса жидкости,  $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ ;

$\omega$  – скорость движения воздуха над поверхностью испарения, м/с.

Массу паров ЛВЖ при испарении со свободной поверхности в резервуаре можно также определять по формуле:

$$m = W \cdot F \cdot \tau_E, \quad (69)$$

где  $W$  – интенсивность испарения,  $\text{кг} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^2$ ;

$\tau_E$  – время поступления паров из резервуара, с.

Интенсивность испарения  $W$  ( $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ) для ненагретых жидкостей определяется по формуле (70):

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_S, \quad (70)$$

где  $\eta$  – коэффициент, принимаемый для помещений по табл. 28 в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения. При проливе жидкости вне помещения допускается принимать  $\eta = 1$ ;

Таблица 26

Значение коэффициента  $\eta$  в зависимости от скорости и температуры воздушного потока

Скорость воздушного потока, м/с	Значение коэффициента $\eta$ при температуре $t$ (°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

При выбросе СУГ из оборудования, в котором жидкость находится под давлением, часть продукта за счет внутренней энергии мгновенно испаряется, образуя с капельками жидкости облако аэрозоля. Массовая доля мгновенно испарившейся жидкости определяется по формуле:

$$\delta = 1 - \exp\left(-\frac{C_p \cdot (T_a - T_b)}{L_g}\right), \quad (71)$$

где  $C_p$  – удельная теплоемкость СУГ, Дж/кг · К;  
 $T_a$  – температура окружающего воздуха, К;  
 $T_b$  – температура кипения СУГ при атмосферном давлении, К;  
 $L_g$  – удельная теплота парообразования СУГ, Дж/кг.

Принимается, что при  $\delta \geq 0,35$  вся масса жидкости, находящаяся в оборудовании, за счет взрывного характера испарения переходит в парокапельное облако.

При  $\delta < 0,35$  оставшаяся часть жидкости испаряется с поверхности пролива за счет потока тепла от подстилающей поверхности и воздуха.

Интенсивность испарения жидкости со свободной поверхности  $W$  ( $\text{кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$ ) определяется по формуле:

$$W = \frac{(\lambda_s \cdot C_s \cdot \rho_s)^{0,5} \cdot (T_0 - T_b)}{L_g \cdot (\pi \cdot t)^{0,5}} + \frac{0,035 \cdot u^{0,8} \cdot \lambda_a \cdot (T_0 - T_b)}{(v_a^{0,8} \cdot d^{0,2} \cdot L_g)}, \quad (72)$$

где  $\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности материала, на поверхность которого разливается жидкость,  $\text{Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$ ;

$C_s$  – удельная теплоемкость материала,  $\text{Дж} / \text{м} \cdot \text{К}$ ;

$\rho_s$  – плотность материала,  $\text{кг} / \text{м}^3$ ;

$T_0$  – начальная температура материала,  $\text{К}$ ;

$t$  – текущее время с момента начала испарения, с (не менее 10 с);

$\lambda_a$  – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре  $T_0$ ;

$u$  – скорость воздушного потока над поверхностью испарения,  $\text{м} / \text{с}$ ;

$d$  – характерный диаметр пролива, м;

$v_a$  – кинематическая вязкость воздуха при  $T_0$ ,  $\text{м}^2 / \text{с}$ .

#### 4.2.5. Расчет массы газа (М, т), находящегося в секции линейной части магистрального газопровода

Примерная масса газа (М, т) в секции газопровода при отсутствии или небольшом количестве отводов от него (рис. 10) может быть определена по выражению:

$$M = \sqrt{P_n^2 - \left( \frac{P_n^2 - P_k^2}{L_{КС}} \cdot x \right)} \cdot \frac{D_y^2 \cdot L_{секц}}{T} \cdot 1,51 \cdot 10^{-3}, \quad (73)$$

где  $L_{КС}$  – расстояние между двумя последовательными КС, км;  
 $P_n$  – проектное (абс.) давление на выходе предыдущей (по отношению к секции) КС, МПа;  
 $P_k$  – расчетное (абс.) давление на входе последующей КС, МПа;  
 $x$  – расстояние от предыдущей КС до середины секции, км;  
 $L_{секц}$  – длина секции газопровода, км;  
 $D_y$  – условный (внутренний) диаметр газопровода, мм;  
 $T$  – средняя температура газа (К) в секции (в точке  $x$ ), условно рассчитываемая по формуле:

$$T = T_k + (T_n - T_k) \cdot \frac{L_{КС} - x}{L_{КС}}, \quad (74)$$

где  $T_n$  – зимняя температура на выходе предыдущей (по отношению к секции) КС, К;  
 $T_k$  – зимняя температура на входе предыдущей КС, К.  
 $P_n$  – проектное (абс.) давление на выходе предыдущей (по отношению к секции) КС, МПа;

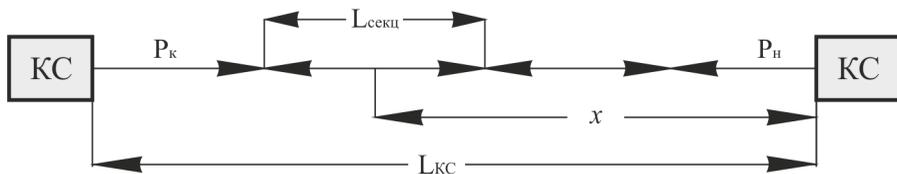


Рис. 10. Схема для расчета массы газа в секции газопровода

При большом количестве газопроводов-отводов от МГ массу газа в его секциях следует рассчитывать по формуле:

$$M = P_x \cdot \frac{D_y^2 \cdot L_{секц}}{T} \cdot 1,51 \cdot 10^{-3}, \quad (75)$$

где  $P_x$  – фактическое (абс.) давление в середине секции, МПа.

При расчете массы газа в газопроводе-отводе можно использовать формулу (73), принимая, что:

$L_{секц} = L_{КС}$  – полная протяженность отвода, км;

$P_n$  – абсолютное давление в точке подключения газопровода-отвода к магистральному газопроводу, МПа;

$P_k$  – абсолютное давление в конце газопровода-отвода (на входе ГРС), МПа;

$x$  – половина общей длины газопровода-отвода КС, км;

$T$  – средняя зимняя температура в газопроводе-отводе, К.

Пример расчета массы в секции МГ. Допустим, требуется рассчитать массу газа в секции между двумя линейными кранами, установленными на газопроводе диаметром  $D_y$ , 1400 мм и проектным давлением 7,5 МПа. Указанные краны расположены соответственно на расстоянии 50 и 75 км от предыдущей КС-1. Расстояние между КС-1 и следующей КС-2 равно  $L_{КС} = 120$  км, на перегоне всего 2 небольших газопровода-отвода малого диаметра. Давление (изб.) и зимняя температура газа на выходе КС-1 по проекту равны соответственно  $P_n = 7,5$  МПа и  $t_n = 33$  °С (т. е.  $T_n = 273 + 33 = 306$  К), а в конце перегона на входе КС-2 –  $P_n = 5,2$  МПа и  $t_k = 8$  °С (т. е.  $T_n = 273 + 8 = 281$  К).

Рассчитаем температуру ( $T$ ) газа в середине указанной секции. Середина секции находится на расстоянии  $x = (50 + 75) / 2 = 62,5$  км от КС-1. В соответствии с формулой (74) абсолютная температура в этой точке равна:

$$T = 281 + (306 - 281) \cdot \frac{120 - 62,5}{120} = 293 \text{ К.}$$

Таким образом, мы имеем все необходимые данные, что-

бы рассчитать массу газа в секции по формуле (73):

$$M = \sqrt{7,6^2 - \left( \frac{7,6^2 - 5,3^2}{120} \cdot 62,5 \right)} \cdot \frac{1400^2 \cdot 25}{293} \cdot 1,51 \cdot 10^{-3} = 1641,4 \text{ т.}$$

При расчетах не следует забывать пересчитывать избыточное давление в абсолютное путем прибавления 0,1 МПа, т. е.

$$P_{абс.} = P_{изб.} + P_{атм.}$$

### 4.3. Оценка размеров взрывоопасных зон

Радиус  $R_{НКПР}$  (м) и высота  $Z_{НКПР}$  (м) зоны, ограничивающие область концентраций, превышающих нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР), при неподвижной воздушной среде рассчитываются по формулам:

для горючих газов:

$$R_{НКПР} = 7,8 \cdot \left( \frac{m_{Г}}{\rho_{Г} \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33}, \quad (76)$$

$$Z_{НКПР} = 0,26 \cdot \left( \frac{m_{Г}}{\rho_{Г} \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33}, \quad (77)$$

для паров ЛВЖ:

$$R_{НКПР} = 7,8 \cdot \left( \frac{m_{П}}{\rho_{П} \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33}, \quad (78)$$

$$Z_{НКПР} = 0,26 \cdot \left( \frac{m_{П}}{\rho_{П} \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33}, \quad (79)$$

где  $m_{Г}$  – масса ГГ, поступившего в открытое пространство при пожароопасной ситуации;

$\rho_{Г}$  – плотность ГГ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup>;

$m_{П}$  – масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время испарения, кг;

$\rho_{П}$  – 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.

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

### 5.1. Определение эффективного энергозапаса горючей смеси

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 ( $C_T$ ), кг/м<sup>3</sup>;
- стехиометрическая концентрация горючего вещества с воздухом ( $C_{CT}$ ), кг/м<sup>3</sup>;
- масса горючего вещества, содержащегося в облаке ( $M_T$ , кг), 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 коэффициент  $Z$  может быть принят 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 ( $E_{уд}$ ), Дж/кг;
- скорость звука в воздухе  $C_0$  (обычно принимается равной 340 м/с);
- информация о степени загроможденности окружающего пространства;
- эффективный энергозапас горючей смеси ( $E$ , Дж), вычисляемый по соотношению:

$$E = \begin{cases} M_r E_{уд}, & C_r \leq C_{cr}; \\ M_r E_{уд} \frac{C_{cr}}{C_r}, & C_r > C_{cr}. \end{cases} \quad (80)$$

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

Стехиометрическая концентрация горючего вещества ( $C_{cr}$ ) в газоздушной смеси определяется из справочных данных или рассчитывается по выражению:

$$C_{cr} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \gamma}, \quad (81)$$

где  $C_{cr}$  – стехиометрическая концентрация ГГ или паров ЛВЖ и ГЖ, % об.

$\gamma$  – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения.

Перерасчет из объемных концентраций в весовые производится по выражению:

$$C_r = 0,12 \cdot 10^{-2} \cdot C_a \cdot \frac{M \cdot P}{T}, \quad (82)$$

где  $C_r$  – числовое значение концентрации в г/м<sup>3</sup>;  
 $C_a$  – числовое значение концентрации, % об.;

$M$  – молекулярная масса газа, г/моль;

$P$  – общее давление газов смеси, Па;

$T$  – температура, К.

Если определение концентрации горючего вещества в смеси затруднено, то в качестве  $C_G$  в соотношении (80) допускается принимать концентрацию, соответствующую нижнему концентрационному пределу воспламенения горючего газа (РД 03-409-01 «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей»).

При оценке масштабов поражения волнами сжатия необходимо учитывать различие химических соединений по теплоте сгорания, используемой для расчета полного запаса энерговыделения. Для типичных углеводородов принимается в расчет значение удельной теплоты сгорания  $E_{уд0} = 44$  МДж/кг. Для иных горючих веществ удельное энерговыделение оценивается по формуле:

$$E_{y0} = E_{уд0} \cdot \beta = 44 \cdot \beta, \quad (83)$$

где  $\beta$  – корректировочный параметр.

Значение корректировочного параметра  $\beta$  для наиболее распространенных в промышленном производстве горючих веществ представлено в табл. 27.

Для многокомпонентной газовой смеси величина  $E_{y0}$  определяется по следующему выражению (содержание компонентов проставляется в % об.):

$$E_{y0} = \left( \begin{array}{l} 25,79H_2 + 85,55CH_4 + 141,07C_2H_2 + \\ + 152,26C_2H_6 + 205,41C_3H_6 + \\ + 217,95C_3H_8 + 271,11C_4H_8 + \\ + 283,38C_4H_{10} + 384,9C_5H_{12} \end{array} \right) \cdot 4,1868 / \rho, \quad (84)$$

где  $\rho$  – плотность газовой смеси, кг/м<sup>3</sup>.

Масса горючего вещества, содержащегося в облаке воздушной смеси, может задаваться в качестве исходного параметра или определяться исходя из условий развития аварий.

## **5.2. 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. Среднечувствительные вещества (размер детонационной ячейки лежит в пределах от 10 до 40 см).

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

Классификация наиболее распространенных в промышленном производстве горючих веществ приведена в табл. 29. 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 27

## Классификация горючих веществ по степени чувствительности

Класс							
1-й		2-й		3-й		4-й	
Особо чувствительные		Чувствительные		Средне-чувствительные		Слабо-чувствительные	
Размер детонационной ячейки							
менее 2 см		от 2 до 10 см		от 10 до 40 см		больше 40 см	
<i>l</i>	<i>β</i>	<i>l</i>	<i>β</i>	<i>l</i>	<i>β</i>	<i>l</i>	<i>β</i>
Ацетилен	1,1	Акрилонитрил	0,67	Ацетальдегид	0,56	Аммиак	0,42
Винилацетилен	1,03	Акролеин	0,62	Ацетон	0,65	Бензол	0,88
Водород	2,73	Буган	1,04	Бензин	1	Декан	1
Гидразин	0,44	Бутилен	1	Винилацетат	0,51	Дизтопливо	1
Изопропилнитрат	0,41	Бугадиен	1	Винилхлорид	0,42	о-дихлорбензол	0,42
Метилацетилен	1,05	1,3-пентадиен	1	Гексан	1	Додекан	1
Нитрометан	0,25	Пропан	1,05	Генераторный газ	0,38	Керосин	1
Окись пропилена	0,7	Пропилен	1,04	Изооктан	1	Метан	1,14
Окись этилена	0,62	Сероуглерод	0,32	Метиламин	0,7	Метилбензол	1
Этилнитрат	0,3	Этан	1,08	Метилацетат	0,53	Метилмеркаптан	0,53
		Этилен	1,07	Метилбутилкетон	0,79	Метилхлорид	0,12
		ШФЛУ	1	Метилпропилкетон	0,76	Нафталин	0,91
		Диметиловый эфир	0,66	Метилэтилкетон	0,71	Окись углерода	0,23
		Дивиниловый эфир	0,77	Октан	1	Фенол	0,92

1	2	3	4	5	6	7	8
		Метилбутиловый эфир	-	Пиридин	0,77	Хлорбензол	0,52
		Диэтиловый эфир	0,77	Сероводород	0,34	Этилбензол	0,90
		Диизопропиловый эфир	0,82	Метилловый спирт	0,52	Дихлорэтан	0,25
				Этиловый спирт	0,62	Трихлорэтан	0,14
				Пропиловый спирт	0,69		
				Амиловый спирт	-		
				Изобутиловый спирт	0,79		
				Изопропиловый спирт	0,69		
				Циклогексан	1		
				Этилформиат	0,46		
				Этилхлорид	0,43		
				Сжиженный природный газ	1		
				Кумол	0,84		
				Печной газ	0,09		
				Циклопропан	1		
				Этиламин	0,8		

### 5.3. Классификация окружающего пространства по степени загроможденности

Характером загроможденности окружающего пространства в значительной степени определяется скорость распространения пламени при сгорании газо-, поро- или пылевоздушного облака и, следовательно, параметры волны давления. Окружающее

пространство по степени загроможденности делится 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 неизвестен, 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 – сильнозагроможденное пространство: наличие полузамкнутых объемов, высокая плотность размещения технологического оборудования, лес, большое количество повторяющихся препятствий;

класс III – среднезагроможденное пространство: отдельно стоящие технологические установки, резервуарный парк;

класс IV – слабозагроможденное и свободное пространство.

#### **5.4. Классификация режимов сгорания облака**

Для оценки воздействия сгорания облака возможные режимы сгорания разбиты на шесть классов по диапазонам скоростей их распространения, причем пять из них приходится на процессы дефлаграционного горения воздушной смеси. Необходимо отметить, что характеристики процесса горения со скоростями фронта меньшими 500 м/с имеют существенные качественные различия.

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:

$$u = k_1 \cdot M^{1/6}, \quad (85)$$

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

Класс 6. Дефлаграция, скорость фронта пламени определяется соотношением:

$$u = k_2 \cdot M^{1/6}, \quad (86)$$

где  $k_2$  – константа, равная 26;  
 $M$  – масса горючего вещества, содержащегося в облаке, кг.

Ожидаемый режим сгорания облака определяется с помощью табл. 30, в зависимости от класса горючего вещества и класса загроможденности окружающего пространства.

Таблица 30

Экспертная таблица для определения режима сгорания облака

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

При определении максимальной скорости фронта пламени для режимов сгорания 2–4-го классов дополнительно рассчитывается видимая скорость фронта пламени по соотношению (85). В том случае, если полученная величина больше максимальной скорости, соответствующей данному классу, она принимается за верхнюю границу диапазона ожидаемых скоростей сгорания облака.

## 5.5. Расчет максимального избыточного давления и импульса фазы сжатия воздушных волн давления

Параметры воздушных волн сжатия (избыточное давление  $\Delta P$  и импульс фазы сжатия  $I^+$ , рис. 11) в зависимости от расстояния от центра облака рассчитываются исходя из ожидаемого режима сгорания облака.



Рис. 11. Характерный профиль ударной волны

### *Класс 1 режима сгорания облака*

Для вычисления параметров воздушной ударной волны на заданном расстоянии  $R$  от центра облака при детонации облака газозвушной смеси предварительно рассчитывается соответствующее безразмерное расстояние по соотношению:

$$R_x = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}}, \quad (87)$$

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):

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66 \cdot (\ln(R_x)) + 0,260 \cdot (\ln(R_x))^2, \quad (88)$$

$$\ln(I_x) = -3,4217 - 0,898 \cdot (\ln(R_x)) - 0,0096 \cdot (\ln(R_x))^2. \quad (89)$$

Зависимости (88) и (89) 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 (88) вместо  $R_x$  подставляется величина  $R_x = 0,14$ .

В случае детонации облака гетерогенной газопаровоздушной смеси расчет производится по следующим формулам:

$$P_x = 0,125/R_x + 0,137/R_x^2 + 0,023/R_x^3, \quad (90)$$

$$I_x = 0,022 / R_x. \quad (91)$$

Зависимости (90) и (91) справедливы для значений  $R_x$  больших величин  $R_k = 0,25$ . В случае  $R_x < R_k$ , величина  $P_x$  полагается равной 18, а в выражение (91) вместо  $R_x$  подставляется величина  $R_x = 0,134$ .

Размерные величины избыточного давления и импульса фазы сжатия вычисляются по формулам:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0, \quad (92)$$

$$I^+ = I_x \cdot P_0^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0, \quad (93)$$

#### *Классы 2–6 режима сгорания облака*

Рассчитывается безразмерное расстояние  $R_x$  от центра облака по формуле (87).

Рассчитываются величины безразмерного давления ( $P_{xI}$ ) и импульса фазы сжатия ( $I_{xI}$ ) по формулам:

$$P_{xI} = \left( \frac{u^2}{C_0^2} \right) \cdot \left( \frac{\sigma - I}{\sigma} \right) \cdot \left( \frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right), \quad (94)$$

$$I_{x1} = W(1 - 0,4W) \cdot \left( \frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right), \quad (95)$$

$$W = \frac{u}{C_0} \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right), \quad (96)$$

где  $\sigma$  – степень расширения продуктов сгорания (для газопаровоздушных смесей допускается принимается равным 7, для пылевоздушных смесей – 4);

$u$  – видимая скорость фронта пламени, м/с;

$C_0$  – скорость звука в воздухе, м/с.

В случае дефлаграции пылевоздушного облака величина эффективного энергозапаса умножается на коэффициент  $(\sigma - 1)/\sigma$ .

Выражения (94), (95) справедливы для значений  $R_x$  больших величины  $R_{kpl} = 0,34$ , в случае если  $R_x < R_{kpl}$ , в выражения (94), (95) вместо  $R_x$  подставляется величина  $R_{kpl}$ .

Вычисляются размерные величины избыточного давления и импульса фазы сжатия по формулам (92), (93). При этом в формулы (92), (93) вместо  $P_x$  и  $I_x$  подставляются величины  $P_{x1}$  и  $I_{x1}$ .

## 5.6. Расчет волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сниженным газом

Избыточное давление  $\Delta P$  и импульс  $I^+$  в волне сжатия, образующиеся при взрыве резервуара с перегретой ЛВЖ, ГЖ или СУГ в очаге пожара, определяются по формулам:

$$\Delta P = P_0 \left( 0,8 \cdot \frac{m_{ПП}^{0,33}}{r} + 3 \cdot \frac{m_{ПП}^{0,66}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{ПП}}{r^3} \right), \quad (97)$$

$$I^+ = 123 \cdot \frac{m_{ПП}^{0,66}}{r}, \quad (98)$$

где  $m_{np} = \frac{E_{eff}}{H_0}$  – приведенная масса, кг; (99)

$r$  – расстояние от центра резервуара, м;

$H_0 = 4,52 \cdot 10^6$  Дж/кг;

$E_{eff}$  – эффективная энергия взрыва, рассчитываемая по формуле:

$$E_{eff} = k \cdot C_p \cdot m \cdot (T - T_b), \quad (100)$$

$k$  – 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:

$$T = \frac{B}{A - \lg P_{val}} - C_A + 273,15, \quad (101)$$

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.

## 6. ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

### 6.1. Пожар пролива

Интенсивность теплового излучения  $q$  (кВт/м<sup>2</sup>) для пожара пролива ЛВЖ, ГЖ, сжиженного природного газа (СПГ) или СУГ определяется по формуле:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau, \quad (102)$$

где  $E_f$  – среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м<sup>2</sup>;

$F_q$  – угловой коэффициент облученности;

$\tau$  – коэффициент пропускания атмосферы.

Значение  $E_f$  принимается на основе имеющихся экспериментальных данных или по табл. 31.

Таблица 31

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 <sup>2</sup> , при $d$ , м					$m'$ , кг/(м <sup>2</sup> ·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  $E_f$  такой же, как и для очагов диаметром 10 и 50 м соответственно.

При отсутствии данных для нефти и нефтепродуктов допускается величину  $E_f$  (кВт/м<sup>2</sup>) определять по формуле:

$$E_f = 140 \cdot e^{-0,12 \cdot d} + 20 \cdot (1 - e^{-0,12 \cdot d}), \quad (103)$$

где  $d$  – эффективный диаметр пролива, м.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину  $E_f$  (кВт/м<sup>2</sup>) определять по формуле:

$$E_f = \frac{0,4 \cdot m' \cdot H_{CG}}{\left(1 + 4 \cdot \frac{L}{d}\right)}, \quad (104)$$

где  $m'$  – удельная массовая скорость выгорания, кг/(м<sup>2</sup>·с) (табл. 31; прил. В);

$H_{CG}$  – удельная теплота сгорания, кДж/кг;

$L$  – длина пламени, м.

При отсутствии данных для однокомпонентных жидкостей допускается величину  $m'$  (кг/(м<sup>2</sup>·с)) определять по формуле:

$$m' = \frac{0,001 \cdot H_{CG}}{L_g + C_p(T_b - T_a)}, \quad (105)$$

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  $Fq$  определяется по формуле:

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (106)$$

где  $F_V, F_H$  – факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок соответственно, определяемые для площадок, расположенных в  $90^\circ$  секторе в направлении наклона пламени, по следующим формулам:

$$F_V = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ -E \cdot \arctg D + E \cdot \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) + \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left[ \arctg \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \arctg \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \right\}, \quad (107)$$

$$F_H = \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \arctg \left( \frac{1}{D} \right) + \frac{\sin \theta}{C} \cdot \left[ \arctg \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \arctg \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] - \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \arctg \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) \right\}, \quad (108)$$

$$a = \frac{2 \cdot L}{d}, \quad (109)$$

$$b = \frac{2 \cdot X}{d}, \quad (110)$$

$$A = \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin \theta)}, \quad (111)$$

$$B = \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin \theta)}, \quad (112)$$

$$C = \sqrt{(1 + (b^2 - 1) \cdot \cos^2 \theta)}, \quad (113)$$

$$D = \sqrt{\left( \frac{b-1}{b+1} \right)}, \quad (114)$$

$$E = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta}, \quad (115)$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)}, \quad (116)$$

где  $X$  – расстояние от геометрического центра пролива до облучаемого объекта, м;

$d$  – эффективный диаметр пролива, м;

$L$  – длина пламени, м;

$\theta$  – угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра.

Для площадок, расположенных вне указанного сектора, а также в случаях отсутствия ветра факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок рассчитываются по формулам (107)–(116) и (119), принимая  $\theta = 0$ .

Эффективный диаметр пролива  $d$  (м) рассчитывается по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi}}, \quad (117)$$

где  $F$  – площадь пролива, м<sup>2</sup>.

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

$$L = 55 \cdot d \cdot \left( \frac{m'}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right)^{0,67} \cdot u_*^{0,21}, \quad (118)$$

при  $u_* < 1$

$$L = 42 \cdot d \cdot \left[ \frac{m'}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right]^{0,61}, \quad (119)$$

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m' \cdot g \cdot d}{\rho_{\Pi}}}}, \quad (120)$$

где  $m'$  – удельная массовая скорость выгорания топлива, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$\rho_a$  – плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\Pi}$  – плотность насыщенных паров топлива при температуре кипения, кг/м<sup>3</sup>;

$w_0$  – скорость ветра, м/с;

$g$  – ускорение свободного падения (9,81 м/с<sup>2</sup>).

Угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра  $\theta$  рассчитывается по формуле:

$$\cos \theta = \begin{cases} 1, & \text{при } u_* < 1 \\ u_*^{-0,5}, & \text{при } u_* \geq 1 \end{cases}. \quad (121)$$

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau$  для пожара пролива определяется по формуле:

$$\tau = \exp[-7 \cdot 10^{-4} \cdot (X - 0,5 \cdot d)]. \quad (122)$$

## 6.2. «Огненный шар»

Интенсивность теплового излучения  $q$  (кВт/м<sup>2</sup>) для «огненного шара» определяется по формуле (105).

Величина  $E_f$  определяется на основе имеющихся экспериментальных данных. Допускается принимать  $E_f$  равной 350 кВт/м<sup>2</sup>.

Значение  $F_q$  определяется по формуле:

$$F_q = \frac{D_s^2}{4 \cdot (H^2 + r^2)}, \quad (123)$$

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:

$$D_s = 6,48 \cdot m^{0,325}, \quad (124)$$

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:

$$t_s = 0,852 \cdot m^{0,26}. \quad (125)$$

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau$  для «огненного шара» рассчитывается по формуле:

$$\tau = \exp[-7,0 \cdot 10^{-4} \cdot (\sqrt{r^2 + H^2} - \frac{D_s}{2})]. \quad (126)$$

### **6.3. Определение зон поражения при пожаре-вспышке и факельном горении**

В случае образования паровоздушной смеси в не загроможденном технологическом оборудовании 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:

$$R_F = 1,2 \cdot R_{НКПР}, \quad (127)$$

где  $R_{НКПР}$  — горизонтальный размер взрывоопасной зоны, определяемый по п. 2.4.

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

Длина факела  $L_\phi$  (м) при струйном горении вычисляется по формуле:

$$L_\phi = K \cdot G^{0,4}, \quad (128)$$

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 и СПГ, ЛВЖ и ГЖ под давлением — 15.

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

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

$$D_F = 0,15 \cdot L_\phi. \quad (129)$$

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 окружаю-

щими 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  $30^\circ$  секторе с радиусом, равным длине факела;

- воздействие горизонтального факела на соседнее оборудование, приводящее к его разрушению (каскадному развитию аварии), происходит в  $30^\circ$  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  $10 \text{ кВт/м}^2$ ;

- тепловое излучение от вертикальных факелов может быть определено по формулам (102), (106)–(117) и (122), принимая  $L$  равным  $L_F$ ,  $d$  – равным  $D_F$ ,  $\theta$  – равным 0, а  $E_f$  – по формулам (103)–(105) или табл. 31 в зависимости от вида топлива. При отсутствии данных и невозможности рассчитать  $E_f$  по представленным формулам допускается эту величину принимать равной  $200 \text{ кВт/м}^2$ ;

- 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 ( $30^\circ$  сектор, ограниченный радиусом, равным  $L_F$ );

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

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

### 7.1. 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:

$$\tau_{\text{бл}} = \min \{ t_{\text{КР}}^T, t_{\text{КР}}^{\text{П.В}}, t_{\text{КР}}^{\text{O}_2}, t_{\text{КР}}^{\text{T.Г}} \}. \quad (130)$$

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;

тепловому потоку – 1400 Вт/м<sup>2</sup>;

потере видимости – 20 м;

пониженному содержанию кислорода – 0,226 кг·м<sup>-3</sup>;

каждому из токсичных газообразных продуктов горения (СО<sub>2</sub> – 0,11 кг·м<sup>-3</sup>, СО – 1,16·10<sup>-3</sup> кг·м<sup>-3</sup>, НСL – 23·10<sup>-6</sup> кг·м<sup>-3</sup>).

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 различаются 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.).

***Долевой 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 продолжительность 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:

$$t_{кр}^T = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{70 - t_o}{(273 + t_o) \cdot Z} \right] \right\}^{1/n}; \quad (131)$$

потере видимости:

$$t_{кр}^{n.g.} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ \left( 1 - \frac{V \cdot \ln(1,05 \cdot \alpha \cdot E)}{l_{np} \cdot B \cdot D_m \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/n}; \quad (132)$$

пониженному содержанию кислорода:

$$t_{кр}^{O_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ \left( 1 - \frac{0,044}{\left( \frac{B \cdot L_{O_2}}{V} + 0,27 \right) \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/n}; \quad (133)$$

каждому из газообразных токсичных продуктов горения:

$$t_{кр}^{m.g.} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ \left( 1 - \frac{V \cdot X}{B \cdot L \cdot Z} \right)^{-1} \right] \right\}^{1/n}; \quad (134)$$

$$B = \frac{353 \cdot C_P \cdot V}{(1 - \varphi) \cdot \eta \cdot Q}, \quad (135)$$

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/с<sup>n</sup>;  
 $Z$  – безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения опасного фактора пожара по высоте помещения;  
 $Q$  – низшая теплота сгорания материала, МДж/кг (прил. А, Б);  
 $C_p$  – удельная изобарная теплоемкость воздуха, МДж/кг (прил. Г);  
 $\varphi$  – коэффициент теплопотерь (принимается по справочным данным. При отсутствии данных может быть принят равным 0,3);  
 $\eta$  – коэффициент полноты горения (определяется по формуле 137);  
 $V$  – свободный объем помещения, м<sup>3</sup>;  
 $\alpha$  – 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·м<sup>2</sup>/кг (прил. В);  
 $L$  – удельный выход токсичных газов при сгорании 1 кг горючего вещества, кг/кг (прил. В);  
 $X$  – предельно допустимое содержание токсичного газа в помещении, кг/м<sup>3</sup> (см. п. 7.1);  
 $L_{O_2}$  – удельный расход кислорода, кг/кг (прил. В).

Величину  $C_p$  обычно находят по таблицам, в которых значения теплоемкостей приводятся для интервалов температур с началом отсчета 0 °С. Тогда среднюю теплоемкость для интервала температур от  $t_1$  до  $t_2$  можно определить по формуле:

$$\left| C_p \right|_{t_1}^{t_2} = \frac{\left| C_p \right|_0^{t_2} \cdot t_2 - \left| C_p \right|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1} \quad (136)$$

Формула (136) позволяет вычислить средние теплоемкости при нелинейной зависимости теплоемкости от температуры.

Коэффициент полноты горения  $\eta$  определяется по формуле:

$$\eta = \eta_a \cdot K + (1 - K) \cdot \frac{X_{ox,a} \cdot G_a}{\Psi \cdot L_{ox}}, \quad (137)$$

где  $\eta_a$  – коэффициент полноты горения в режиме пожара, регулируемом горючей нагрузкой, определяемый по формуле:

$$\eta_a = 0,63 + 0,2 \cdot X_{ox,a} + 1500 \cdot X_{ox,a}^6. \quad (138)$$

Коэффициент  $K$  рассчитывается по формуле:

$$K = \left( \frac{X_{ox,m}}{X_{ox,a}} \right)^B \exp \left( B \cdot \left( 1 - \frac{X_{ox,m}}{X_{ox,a}} \right) \right), \quad (139)$$

$$B = \left( \frac{X_{ox,a}}{X_{ox,a} - 0,01} \right)^2, \quad (140)$$

где  $X_{ox,a}$  – начальная концентрация кислорода в помещении очага пожара;

$X_{ox,m}$  – текущая концентрация кислорода в помещении очага пожара;

$\Psi$  – скорость выгорания пожарной нагрузки, зависящей от вида развития пожара, кг/с;

$L_{ox}$  – количество кислорода поглощающегося при сгорании одного килограмма пожарной нагрузки, 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:

$$Z = \frac{h}{H} \cdot \exp\left(1,4 \frac{h}{H}\right), \text{ при } H \leq 6 \text{ м}, \quad (141)$$

где  $h$  – высота рабочей зоны, м;

$H$  – высота помещения, м.

Высота рабочей зоны определяется по формуле:

$$h = h_{пл} + 1,7 - 0,5 \cdot \delta, \quad (142)$$

где  $h_{пл}$  – высота площадки, на которой находятся люди, над полом помещения, м;

$\delta$  – 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:

$$A = \Psi_F \cdot F, \text{ при } n = 1; \quad (143)$$

для случая горения жидкости с неустановившейся скоростью:

$$A = \frac{0,67 \cdot \Psi_F \cdot F}{\sqrt{\tau_{CT}}}, \text{ при } n = 1,5; \quad (144)$$

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

$$A = 1,05 \cdot \Psi_F \cdot v^2, \text{ при } n = 3; \quad (145)$$

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

$$A = \Psi_F \cdot v \cdot b, \text{ при } n = 2, \quad (146)$$

где  $\Psi_F$  – удельная массовая скорость выгорания вещества, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$F$  – площадь пролива жидкости;

$\tau_{CT}$  – время установления стационарного режима горения жидкости, с;

$v$  – линейная скорость распространения пламени, м/с;

$b$  – перпендикулярный к направлению движения пламени размер зоны горения, м.

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  $\alpha$  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.

## 7.2. Метод определения расчетного времени эвакуации

Расчетное время эвакуации людей  $t_P$  из помещений и зданий устанавливают по расчету времени движения одного или нескольких людских потоков через эвакуационные выходы от наиболее удаленных мест размещения людей непосредственно нару-

жу или в безопасную зону.

При расчете весь путь движения людского потока подразделяют на участки (проход, коридор, дверной проем, лестничный марш, тамбур) длиной  $l_i$  и шириной  $\delta_i$ . 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:

$$t_p = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_i, \quad (147)$$

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:

$$t_1 = \frac{l_1}{v_1}, \quad (148)$$

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. 30 в зависимости от плотности  $D$ ).

Плотность однородного людского потока на первом уча-

стке пути  $D_1$  рассчитывают по формуле:

$$D_1 = \frac{N_1 \cdot f}{l_1 \cdot \delta_1}, \quad (149)$$

где  $N_1$  – число людей на первом участке, чел.;

$f$  – средняя площадь горизонтальной проекции человека,  $\text{м}^2$ , принимаемая равной 0,125;

$\delta_1$  – ширина первого участка пути, м.

Скорость  $v_1$  движения людского потока на участках пути, следующих после первого, принимают по табл. 32 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:

$$q_i = \frac{q_{i-1} \cdot \delta_{i-1}}{\delta_i}, \quad (150)$$

где  $\delta_i, \delta_{i-1}$  – 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. 32 по значению  $D_1$ , установленному по формуле (149).

Если значение  $q_i$  определяемое по формуле (150), меньше или равно  $q_{max}$ , то время движения по участку пути  $t_i$ , мин, равно:

$$t_i = \frac{l_i}{v_i}, \quad (151)$$

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 (150), больше  $q_{max}$ , то ширину  $\delta_i$  данного участка пути следует увеличивать на такое значение, при котором соблюдается условие:

$$q_i \leq q_{max}. \quad (152)$$

При невозможности выполнения условия (152) интенсивность и скорость движения людского потока по участку  $i$  определяют по табл. 32 при значении  $D = 0,9$  и более. При этом следует учитывать время задержки движения людей из-за образовавшегося скопления.

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

$$t_{зад}^i = N \cdot f \cdot \left( \frac{1}{q_D \cdot \delta_{i+1}} - \frac{1}{q_i \cdot \delta_i} \right), \quad (153)$$

где  $N$  – количество людей, чел.;

$f$  – площадь горизонтальной проекции, м<sup>2</sup>;

$q_D$  – интенсивность движения через участок  $(i+1)$  при плотности 0,9 и более, м/мин;

$\delta_{i+1}$  – ширина участка, м, при вхождении на который образовалось скопление людей;

$q_i$  – интенсивность движения на участке  $i$ , м/мин;

$\delta_i$  – ширина предшествующего участка  $i$ , м.

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

$$t_{СК} = \frac{Nf}{q_D b_{i+1}}. \quad (154)$$

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

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

Плотность потока $D$ , $\text{м}^2/\text{м}^2$	Горизонтальный путь		Дверной про- ем, интенсивность $q$ , м/мин	Лестница вниз		Лестница вверх	
	скорость $v$ , м/мин	интенсив- ность $q$ , м/мин		скорость $v$ , м/мин	интенсив- ность $q$ , м/мин	скорость $v$ , м/мин	интенсив- ность $q$ , м/мин
1	2	3	4	5	6	7	8
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  $q = 2,5 + 3,75 \delta$ .

Расчётное время эвакуации по участку  $i$  допускается определять по формуле:

$$t_i = \frac{l_i}{v_i} + t_{\text{зад}} \quad (155)$$

При слиянии в начале участка  $i$  двух и более людских потоков (рис. 12) интенсивность движения  $q_i$ , м/мин, рассчитывают по формуле:

$$q_i = \frac{\sum q_{i-1} \cdot \delta_{i-1}}{\delta_i}, \quad (156)$$

где  $q_{i-1}$  – интенсивность движения людских потоков, сливающихся в начале участка  $i$ , м/мин;

$\delta_{i-1}$  – ширина участков пути слияния, м;

$\delta_i$  – ширина рассматриваемого участка пути, м.

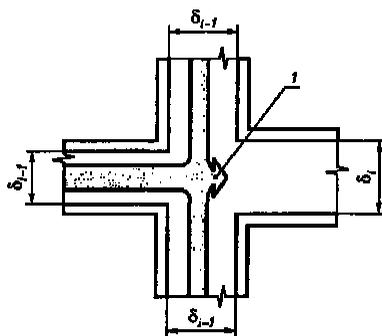


Рис. 12. Слияние людских потоков:  
 $1$  – начало участка  $i$

Если значение  $q_i$ , определенное по формуле (156), больше  $q_{\text{max}}$  то ширину  $\delta_i$  данного участка пути следует увеличивать на такое значение, чтобы соблюдалось условие (152). В этом случае время движения по участку  $i$  определяют по формуле (151).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

### *Нормативные документы:*

1. Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. № 116-ФЗ.
2. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008 г. № 123-ФЗ.
3. ГОСТ 12.1.004-91 «Пожарная безопасность. Общие требования».
4. ГОСТ Р 12.3.047-98 «Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля».
5. ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей. – М.: Стандартинформ, 2011.
6. «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности» (приказ МЧС от 30.06.2009 г. № 382, зарегистрировано в Минюсте от 06.08.2009 г. № 14486).
7. «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах» (приказ МЧС от 10.07.2009 г. № 404, зарегистрировано в Минюсте от 17.08.2009 г. № 14541).
8. Постановление Правительства РФ № 87 от 16 февраля 2008 г. «О составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию».
9. Постановление Правительства РФ № 272 от 31 марта 2009 г. «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска».
10. РД 03-409-01 «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей».
11. РД-03-418-01 «Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов».
12. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий.
13. СНиП 2.05.06-85\* «Магистральные трубопроводы».
14. СНиП23-01-99\* «Строительная климатология».
15. СНиП 2.01.01-82.
16. СП 12.13130.2009 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности».

*Основная литература:*

17. Акимов, В.А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах: уч. пособие / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. – М.: Деловой экспресс, 2004.

18. Брушлинский, Н.Н. О понятии пожарного риска и связанных с ним понятий // Пожарная безопасность. – 1999. – № 3.

19. Корольченко А.Я. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов и средства их тушения: справочник: в 2 ч. / А.Я. Корольченко, Д.А. Корольченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Ас. Пожнаука, 2004.

20. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара: уч. пособие. – М.: Академия ГПС МВД РФ, 2000. – 118 с.

21. Монахов, В.Т. Показатели пожарной опасности веществ и материалов. Анализ и предсказание. Газы и жидкости. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. – 248 с.

22. Пожарная безопасность: уч. пособие / Ю.И. Иванов, А.С. Голик, А.С. Мамонтов, Д.А. Бесперстов; под ред. А.С. Голика; Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2011. – 241 с.

23. Пособие по определению расчетных величин пожарного риска для производственных объектов (первая редакция). – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2010. – 125 с.

24. 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. – 63 с.

25. Сборник методических документов, применяемых для независимой оценки рисков в области пожарной безопасности, гражданской обороны и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций / Союз организаций, осуществляющий экспертную деятельность в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, пожарной и экологической безопасности; под ред. чл.-кор. РАН Н.А. Махутова. Ч. 1. – М., 2008. – 704 с.

26. Холщевников, В.В. Эвакуация и поведение людей при пожарах: уч. пособие / В.В. Холщевников, Д.А. Самошин. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2009. – 212 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**Некоторые свойства и показатели пожарной опасности веществ и материалов**

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
1	Алюминий	Al	26,98	–	+320	–	–	–	–	40	ГП	31097
2	Амилацетат	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	130,196	+43	+290	6,29350	1579,510	221,365	25÷147	1,08	ЛВЖ	29879
3	Амилен	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70,134	<–18	+273	5,91048	1014,294	229,783	–60÷100	1,49	ЛВЖ	45017
4	н-Амиловый спирт	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> O	88,149	+48	+300	6,3073	1287,625	161,330	74÷157	1,46	ЛВЖ	38385
5	Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,03	–	+650	–	–	–	–	15,0	ГП	18585
6	Анилин	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	93,128	+73	+617	6,04622	1457,02	176,195	35÷184	1,3	ГЖ	32386
7	Ацетальдегид	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	44,053	–40	+172	6,31653	1093,537	233,413	–80÷20	4,12	ЛВЖ	27071
8	Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,038	–	+335	–	–	–	–	2,5	ГГ (ВВ)	49965

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
9	Ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58,08	-18	+535	6,37551	1281,721	237,088	-15-93	2,7	ЛВЖ	31360
10	Бензиловый спирт	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O	108,15	+90	+415	-	-	-	-	1,3	ГЖ	-
11	Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,113	-11	+560	5,61391 6,10906	902,275 1252,776	178,099 225,178	-20÷6 -7÷80	1,43	ЛВЖ	40576
12	Бензойная кислота	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	122,12	-	+532	8,70321 3	2792,832	230,470	-	20	ГП	26007
13	1,3-Бугадиен	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54,091	-	+430	-	-	-	-	2,0	ГГ	44573
14	н-Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,123	-69	+405	6,00525	968,098	242,555	-130÷0	1,8	ГГ	45713
15	1-Бутен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56,107	-	+384	-	-	-	-	1,6	ГГ	45317
16	2-Бутен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56,107	-	+324	-	-	-	-	1,8	ГГ	45574
17	н-Бутил-ацетат	C <sub>7</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>	116,16	+29	+330	6,25205	1430,418	210,745	59÷126	1,35	ЛВЖ	28280

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
18	втор-Бутил-ацетат	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	116,16	+19	+410	–	–	–	–	1,4	ЛВЖ	28202
19	н-Бутиловый спирт	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74,122	+35	+340	8,72232	2664,684	279,638	–1÷126	1,8	ЛВЖ	36805
20	Винилхлорид	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	62,499	–	+470	6,0161	905,008	239,475	–65÷–13	3,6	ГГ	18496
21	Водород	H <sub>2</sub>	2,016	–	+510	–	–	–	–	4,12	ГГ	119841
22	Галловая кислота	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>5</sub>	170,13	–	+407 (аэрогеля)	–	–	–	–	130	ГП	16516
23	н-Гексадекан	C <sub>16</sub> H <sub>34</sub>	226,44	+128	+207	5,91242	1656,405	136,869	105÷287	0,47	ГЖ (ТГВ)	44312
24	н-Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86,177	–23	+233	5,99517	1166,274	223,661	–54÷69	1,24	ЛВЖ	45105
25	н-Гексиловый спирт	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O	102,17	+60	+285	6,17894 7,23663	1293,831 1872,743	152,631 202,666	52÷157 60÷108	1,2	ЛВЖ	39587

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
26	Гептан	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100,203	-4	+223	6,07647	1295,405	219,819	60÷98	1,07	ЛВЖ	44919
27	Гидразин	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	32,045	+38	+132	7,99805	2266,447	266,316	84÷112	4,7	ЛВЖ (ВВ)	14644
28	Глицерин	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	92,1	+198	+400	8,17739	3074,220	214,712	141÷263	2,6	ГЖ	16102
29	Глюкоза	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	180,1	-	+367 (аэрогеля)	-	-	-	-	35	ГП	15563
30	Графит	C	12,001	-	+540– 600 (аэрогеля)	-	-	-	-	-	ГП	3,3·10 <sup>7</sup>
31	Декан	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142,28	+47	+230	6,52023	1809,975	227,700	17÷174	0,7	ЛВЖ	44602
32	Дивиниловый эфир	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	70,1	-30	+360	-	-	-	-	1,7	ЛВЖ	32610
33	N,N-Диметилформамид	C <sub>3</sub> H <sub>7</sub> ON	73,1	+53	+440	6,15939	1482,985	204,342	25÷153	2,35	ЛВЖ	-

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
34	1,4-Диоксан	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88,1	+11	+375	6,64091	1632,425	250,725	12÷101	2,0	ЛВЖ	–
35	1,2-Дихлорэтан	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	98,96	+9	+413	6,78615	1640,179	259,715	–24÷83	6,2	ЛВЖ	10873
36	Диэтиламин	C <sub>4</sub> H <sub>11</sub> N	73,14	–14	+310	6,34794	1267,557	236,329	–33÷59	1,78	ЛВЖ	34876
37	Диэтиловый эфир	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74,12	–41	+180	6,12270	1098,945	232,372	–60÷35	1,7	ЛВЖ	34147
38	n-Додекан	C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	170,337	+77	+202	7,29574	2463,739	253,884	48÷214	0,63	ГЖ	44470
39	Железо	Fe	56	–	+300–940 (аэрозоль)	–	–	–	–	100–875	ГП	7450
40	Изобутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,123	–76	+462	5,95318	916,054	243,783	–159÷12	1,81	ГГ	45578
41	Изобутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56,11	–	+465	–	–	–	–	1,78	ГГ	45928
42	Изобутиловый спирт	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74,12	+28	+390	7,83005	2058.392	245,642	–9÷116	1,8	ЛВЖ	36743

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
43	Изопентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,15	-52	+432	5,91799	1022,551	233,493	-83÷28	1,36	ЛВЖ	45239
44	Изопропилбензол	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub>	120,20	+37	+424	6,06756	1461,643	207,56	2,9÷152,4	0,88	ЛВЖ	46663
45	Изопропиловый спирт	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	60,09	+14	+430	7,51055	1733,00	232,380	-26÷148	2,23	ЛВЖ	34139
46	Кальций	Ca	40,08	-	+730-750 (азрогеля)	-	-	-	-	-	ГП	15800
47	м-Ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,17	+28	+530	6,13329	1461,925	215,073	-20÷220	1,1	ЛВЖ	52829
48	о-Ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,17	+31	+460	6,28893	1575,114	223,579	-3,8÷144,4	1,0	ЛВЖ	41217
49	п-Ксилол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,17	+26	+528	6,25485	1537,082	223,608	-8,1÷138,3	1,1	ЛВЖ	41207
50	Магний	Mg	24,32	-	+420-440	-	-	-	-	25	ГП	25000

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
51	Метан	CH <sub>4</sub>	16,04	–	+537	5,68923	380,224	264,804	–182÷–162	5,28	ГГ	50000
52	Метиловый спирт	CH <sub>4</sub> O	32,04	+6	+440	7,3527	1660,454	245,818	–10÷90	6,98	ЛВЖ	23839
53	Метилпропилкетон	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86,133	+6	+452	6,98913	1870,4	273,2	–17÷103	1,49	ЛВЖ	33879
54	Метилэтилкетон	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72,107	–6	–	7,02453	1292,791	232,340	–48÷80	1,90	ЛВЖ	–
55	Нафталин	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128,06	+80	+520	9,67944 6,7978	3123,337 2206,690	243,569 245,127	0÷80 80÷159	0,9	ТГВ	39435
56	н-Нонан	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128,257	+31	+205	6,17776	1510,695	211,502	2÷150	0,78	ЛВЖ	44684
57	Оксид углерода	CO	28,01	–	+605	–	–	–	–	12,5	ГГ	10104
58	Оксид этилена	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	44,05	–18	+430	–	–	–	–	3,2	ГГ (ВВ)	27696
59	н-Октан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,230	+14	+215	6,09396	1379,556	211,896	–14÷126	0,9	ЛВЖ	44787

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
60	н-Пентадекан	C <sub>15</sub> H <sub>32</sub>	212,42	+115	+203	6,0673	1739,084	157,545	92÷270	0,5	ГЖ	44342
61	Пенополиуретан	–	–	–	+450	–	–	–	–	30	ГП	24850–27360
62	н-Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,150	–44	+286	5,97208	1062,555	231,805	–50÷36	1,47	ЛВЖ	45350
63	γ-Пиколин	C <sub>6</sub> H <sub>7</sub> N	93,128	+39	+578	6,44382	1632,315	224,787	70÷145	1,4	ЛВЖ	36702
64	Пиридин	C <sub>5</sub> H <sub>5</sub> N	79,10	+20	+530	5,91684	1217,730	196,342	–19÷116	1,8	ЛВЖ	35676
65	Полипропилен	(C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> ) <sub>n</sub>	–	–	+325–388 (аэрогеля)	–	–	–	–	40	ГП	44000
66	Полиэтилен	(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> )	–	–	+380 (аэрогеля)	–	–	–	–	20	ГП	46590
67	Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,096	–96	+470	5,95547	813,864	248,116	–189÷–42	2,3	ГТ	46353

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовос- пламе- нения, °С	Константы уравнения Антуана			Темпера- турный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентра- ционный предел рас- пространения пламе- ни, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Харак- теристика вещест- ва	Тепло- та сго- рания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
68	Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,080	–	+455	5,94852	786,532	247,243	–107,3÷–47,1	2,4	ГГ	45604
69	н-Пропило- вый спирт	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O	60,09	+23	+371	7,44201	1751,981	225,125	0÷97	2,3	ЛВЖ	34405
70	Сахар (сахароза)	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	342,3	–	+220 (азрогеля)	–	–	–	–	35–58	ГП	16490
71	Сера	S	256,5	–	+260 (азрогеля)	–	–	–	–	37,5	ГП	9210
72	Сероводород	H <sub>2</sub> S	34,076	–	+246	–	–	–	–	4,3	ГГ	–
73	Сероуглерод	CS <sub>2</sub>	76,14	–43	+102	6,12537	1202,471	245,616	–15÷80	1,0	ЛВЖ	14020
74	Стирол	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104,14	+30	+490	7,06542	2113,057	272,986	–7÷146	1,1	ЛВЖ	43888
75	Тетрагидро- фуран	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72,1	–20	+250	6,12008	1202,29	226,254	23÷100	1,8	ЛВЖ	34730
76	н-Тетрадекан	C <sub>14</sub> H <sub>30</sub>	198,39	+103	+201	6,40007	1950,497	190,513	76÷254	0,5	ГЖ	44377

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
77	Толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92,140	+7	+535	6,0507	1328,171	217,713	-26,7÷110,6	1,27	ЛВЖ	40936
78	н-Тридекан	C <sub>13</sub> H <sub>28</sub>	184,36	+90	+204	7,09388	2468,910	250,310	59÷236	0,58	ГЖ	44424
79	2,2,4-Триметилпентан	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,230	-4	+411	5,93682	1257,84	220,735	-60÷175	1,0	ЛВЖ	44647
80	Уксусная кислота	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	60,05	+40	+465	7,10337	1906,53	255,973	-17÷118	4,0	ЛВЖ	13097
81	н-Ундекан	C <sub>11</sub> H <sub>24</sub>	156,31	+62	+205	6,80501	2102,959	242,574	31÷197	0,6	ГЖ	44527
82	Формальдегид	CH <sub>2</sub> O	30,03	-	+430	5,40973	607,399	197,626	-19÷60	7,0	ГГ	19007
84	Хлорбензол	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Cl	112,56	+29	+637	6,38605	1607,316	235,351	-35÷132	1,4	ЛВЖ	27315
85	Хлорэтан	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	64,51	-50	+510	6,11140	1030,007	238,612	-56÷12	3,8	ГГ	19392
86	Циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84,16	-17	+259	5,96991	1203,526	222,863	6,5÷200	1,3	ЛВЖ	43833
87	Цинк	Zn	65,4	-	+440 (азрогеля)	-	-	-	-	250	ГП	5020

№ п/п	Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, Снкпр % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГЦ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
88	Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,069	–	+515	–	–	–	–	2,9	ГГ	52413
89	Этилацетат	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>	88,10	–3	+446	6,22672	1244,951	217,881	15÷75,8	2,0	ЛВЖ	23587
90	Этилбензол	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,16	+20	+431	6,35879	1590,660	229,581	–9,8÷136,2	1,0	ЛВЖ	41323
91	Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,05	–	+435	–	–	–	–	2,7	ГГ	46988
92	Эпиленгликоль	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	62,068	+111	+412	8,13754	2753,183	252,009	53÷198	4,29	ГЖ	19329
93	Этиловый спирт	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46,07	+13	+400	7,81158	1918,508	252,125	–31÷78	3,6	ЛВЖ	30562
94	Этилцеллозольв	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>	90,1	+40	+235	7,86626	2392,56	273,15	20÷135	1,8	ЛВЖ	26382

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Некоторые свойства и показатели пожарной опасности смесей и технических продуктов

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Молярная масса, $\frac{г}{кмоль}$	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, СНКПР % (об.) ( $\frac{г}{м^3}$ для ГТТ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, $\frac{кДж}{кг}$
						A	B	C <sub>A</sub>				
1	Бензин авиационный Б-70	$C_{7,267}H_{14,796}$	102,2	-34	300	7,54424	2629,65	384,195	-40÷100	0,79	ЛВЖ	44094
2	Бензин А-72 (зимний) (ГОСТ 2084-67)	$C_{6,991}H_{13,108}$	97,2	-36	-	4,19500	682,876	222,066	-60÷85	1,08	ЛВЖ	44239
3	Бензин АИ-93 (летний) (ГОСТ 2084-67)	$C_{7,024}H_{13,706}$	98,2	-36	-	4,12311	664,976	221,695	-60÷95	1,06	ЛВЖ	43641

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, СНКПР % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГП)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
4	Бензин АИ-93 (зимний) (ГОСТ 2084-67)	C <sub>6,911</sub> H <sub>12,168</sub>	95,3	-37	-	4,26511	695,019	223,220	-60÷90	1,1	ЛВЖ	43641
5	Дизельное топливо «З» (ГОСТ 305-73)	C <sub>12,343</sub> H <sub>23,889</sub>	172,3	>+35	+225	5,07818	1255,73	199,523	40÷210	0,61	ЛВЖ	43590
6	Дизельное топливо «Л» (ГОСТ 305-73)	C <sub>14,511</sub> H <sub>29,120</sub>	203,6	>+40	+210	5,00109	1314,04	192,473	60÷240	0,52	ЛВЖ	43419
7	Древесно-стружечная пыль	-	-	-	-	-	-	-	-	60	ГП	14000–17000

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, СНКПР % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГТТ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						A	B	C <sub>A</sub>				
8	Керосин осветительный КО-20 (ГОСТ 4753-68)	C <sub>13,595</sub> H <sub>26,860</sub>	191,7	>+40	+227	4,82177	1211,73	194,677	40÷240	0,55	ЛВЖ	43692
9	Керосин осветительный КО-22 (ГОСТ 4753-68)	C <sub>10,914</sub> H <sub>21,832</sub>	153,1	>+40	+245	5,59599	1394,72	204,260	40÷190	0,64	ЛВЖ	43692
10	Керосин осветительный КО-25 (ГОСТ 4753-68)	C <sub>11,054</sub> H <sub>21,752</sub>	154,7	>+40	+236	5,12496	1223,85	203,341	40÷190	0,66	ЛВЖ	43692

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, СтКПР % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГТТ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
11	Ксилол (смесь изомеров) (ГОСТ 9410-60)	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106,17	+29	+490	6,17972	1478,16	220,535	0÷50	1,1	ЛВЖ	43154
12	Уайт-спирит (ГОСТ 3134-52)	C <sub>10,5</sub> H <sub>21,0</sub>	147,3	>+33	+250	7,13623	2218,3	273,15	20÷80	0,7	ЛВЖ	43966
13.	Масло трансформаторное (ГОСТ 10121-	C <sub>21,74</sub> H <sub>42,8</sub> S <sub>0,04</sub>	303,9	>+135	+270	6,88412	2524,17	174,010	164÷343	0,29	ГЖ	43111
14	Масло АМТ-300 (ТУ38-1Г-68)	C <sub>22,25</sub> H <sub>33,48</sub> S <sub>0,34</sub> N <sub>0,07</sub>	312,9	>+170	+290	6,12439	2240,001	167,85	170÷376	0,2	ГЖ	42257

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, СНКПР % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГТТ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						A	B	C <sub>A</sub>				
15	Масло АМТ-300 Т (ТУ 38101243-	$C_{1904}H_{2438}S_{0,196}N_{0,04}$	260,3	>+189	+334	5,62020	2023,77	164,09	171÷396	0,2	ГЖ	41778
16	Мука пшеничная	–	–	–	–	–	–	–	–	10–35	ГП	16807
17	Мука ржаная	–	–	–	–	–	–	–	–	27	ГП	16740
18	Растворитель Р-4 (н-бутилацетат-12, толуол-	$C_{5,452}H_{7,606}O_{0,535}$	81,7	–4	+550	6,29685	1373,667	242,828	–15÷100	1,65	ЛВЖ	40936

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Моляр- ная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Темпе- ратура вспыш- ки, °С	Темпе- ратура само- вос- пламе- нения, °С	Константы уравнения Антуана			Темпе- ратурный интервал значений констант уравне- ния Антуана, °С	Нижний кон- центра- ционный предел распро- стране- ния пламе- ни, СНКПР % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГТТ)	Харак- тери- стика вещес- тва	Тепло- та сго- рания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						A	B	C <sub>A</sub>				
19	Растворитель Р-4 (ксилол- 15, толуол-70, ацетон-15)	C <sub>6,231</sub> H <sub>7,798</sub> O <sub>0,223</sub>	86,3	-4	-	6,27853	1415,199	244,752	-15÷100	1,38	ЛВЖ	43154
20	Растворитель Р-5 (н-бутил- ацетат-30, ксилол-40, ацетон-30)	C <sub>5,309</sub> H <sub>8,635</sub> O <sub>0,897</sub>	86,8	-9	-	6,30343	1378,851	245,039	-15÷100	1,57	ЛВЖ	43154
21	Растворитель Р-12 (н-бу- тилацетат-30, ксилол-10, толуол-60)	C <sub>,837</sub> H <sub>9,217</sub> O <sub>0,515</sub>	99,6	+10	-	6,17297	1403,079	221,483	0÷100	1,26	ЛВЖ	43154

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, СНКПР % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГТТ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж/кг <sup>-1</sup>
						A	B	C <sub>A</sub>				
22	Растворитель М (н-бутилацетат-30, этилацетат-5, этиловый спирт-60, изобутиловый спирт-5)	C <sub>2,761</sub> H <sub>7,147</sub> O <sub>1,187</sub>	59,36	+6	+397	8,05697	2083,566	267,735	0÷50	2,79	ЛВЖ	36743
23	Растворитель РМЛ (ТУКУ 467-56) (толуол-10, этиловый спирт-64, н-бутиловый спирт-10, этилцетолъв-16)	C <sub>2,645</sub> H <sub>6,810</sub> O <sub>1,038</sub>	55,24	+10	+374	8,69654	2487,728	290,920	0÷50	2,85	ЛВЖ	40936

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, СНКПР % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГТТ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
24	Растворитель РМЛ-218 (МРТУ 6-10-729-68) (н-бутилацетат-9, ксилол-21, 5, толуол-21, 5, этиловый спирт-16, н-бутиловый спирт-3, этилцеллозольв-13; этилаце-	$C_{4,791}H_{8,318}O_{0,974}$	81,51	+4	+599	7,20244	1761,043	251,546	0÷50	1,72	ЛВЖ	43154

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, СНКПР % (об.) (г/м <sup>3</sup> для ГТТ)	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						A	B	C <sub>A</sub>				
25.	Растворитель РМЛ-315(ТУ6-10-1013-70) (н-бутилацетат-18, ксилол-25, толуол-25, н-бутиловый спирт-15, этилцеллозоль-17)	$C_{5,962}H_{9,779}O_{0,845}$	94,99	+16	+367	6,83653	1699,687	241,00	0÷50	1,25	ЛВЖ	43154
26	Сено	—	—	—	+180 (арголев)	—	—	—	—	200	ГП	16652,3

## Окончание прил. Б

№ п/п	Продукт (ГОСТ, ТУ), состав смеси в % масс	Суммарная формула	Молярная масса, кг·кмоль <sup>-1</sup>	Температура вспышки, °С	Температура самовоспламенения, °С	Константы уравнения Антуана			Температурный интервал значений констант уравнения Антуана, °С	Нижний концентрационный предел распространения пламени, СНКПР	Характеристика вещества	Теплота сгорания, кДж·кг <sup>-1</sup>
						А	В	С <sub>А</sub>				
27	Табак	–	–	–	+230 (аэрогеля)	–	–	–	–	41	ГП	17000–19000
28	Торфяная	–	–	–	+425	–	–	–	–	45	ГП	10440
29	Хлопок	–	–	–	+407 (аэрогеля)	–	–	–	–	58	ГП	16300
30	Целлюлоза	–	–	–	+270 (аэрогеля)	–	–	–	–	45–88	ГП	26100
31	Шерсть	–	–	–	570-600	–	–	–	–	142	ГП	20502
32	Уайт-спирит (ГОСТ 3134-52)	C <sub>10,5</sub> H <sub>21,0</sub>	147,3	>+33	+250	7,13623	2218,3	273,15	20÷80	0,7	ЛВЖ	43966

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**

**Значения показателей пожарной опасности по типовой горючей нагрузке в помещениях**

167

Материал	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Дымообразующая способность, (Нп·м <sup>2</sup> )/кг	Удельная массовая скорость выгорания, кг/{м <sup>2</sup> ·с)	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный расход кислорода, кг/кг	Выделение токсичных продуктов горения, кг/кг		
						CO <sub>2</sub>	CO	HC1
Верхняя одежда: ворс, ткани (шерсть и нейлон)	23,3	129	0,013	0,084	3,7	0,47	0,015	–
Резинотехнические изделия: резина, изделия из	36,0	850	0,011	0,018	2,99	0,42	0,015	–
Каюта с синтетической отделкой: дерево, ткани и отделка	15,8	134	0,015	0,018	1,25	0,85	0,043	0,023
Мебель: дерево и облицовка (0,9+0,1)	14,4	84	0,014	0,015	1,29	1,55	0,037	0,0036
Промтовары: текстильные изделия	16,7	61	0,024	0,007	2,56	0,88	0,063	–

Материал	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Дымообразующая способность, (Нп·м <sup>2</sup> )/кг	Удельная массовая скорость выгорания, кг/{м <sup>2</sup> ·с}	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный расход кислорода, кг/кг	Выделение токсичных продуктов горения, кг/кг		
						CO <sub>2</sub>	CO	HC1
Кабельный подвал поток: кабели АВВГ и АПВГ	30,7	521	0,024	0,007	2,19	0,65	0,13	0,02
Толуол	40,9	562	0,048	–	3,1	3,68	0,148	–
Ксилол	см. табл, П.1.2	402	0,09	–	3,62	3,66	0,148	–
Бензин	см. табл, П.1.2	256	0,06	–	3,41	2,92	0,175	–
Керосин	43,7	438	0,048	–	3,34	2,92	3,34	–
Дизельное топливо	см. табл, П.1.2	620	0,043	–	3,37	3,16	0,122	–
Радиоматериалы: полиэтилен, полистирол, полипропилен, гетинакс	34,8	381	0,018	0,014	3,31	0,76	0,1	0,0073

Материал	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Дымообразующая способность, (Нп·м <sup>2</sup> )/кг	Удельная массовая скорость выгорания, кг/{м <sup>2</sup> ·с}	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный расход кислорода, кг/кг	Выделение токсичных продуктов горения, кг/кг		
						CO <sub>2</sub>	CO	HC1
Электротехнические материалы: текстолит, карболит	20,9	327	0,0076	0,013	1,95	0,38	0,056	0,0054
Турбинное масло (ТП-22)	41,9	243	0,03	–	0,28	0,7	0,28	–
Электрокабель АВВГ: ПВХ-оболочка и изоляция	25,0	635	0,024	0,007	2,19	0,4	0,109	0,025
Электрокабель АПВГ: ПВХ-оболочка и полиэтилен	36,4	407	0,024	0,007	2,19	0,9	0,15	0,016
Телефонный кабель ТПВ: ПВХ и полиэтилен	34,6	556	0,0085	0,0022	2,19	0,9	0,124	0,016

Материал	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Дымообразующая способность, (Нп·м <sup>2</sup> )/кг	Удельная массовая скорость выгорания, кг/{м <sup>2</sup> ·с}	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный расход кислорода, кг/кг	Выделение токсичных продуктов горения, кг/кг		
						CO <sub>2</sub>	CO	HC1
Нефть	43,5–46,1	438	0,04	–	3,24	3,1	0,161	–
Ацетон	31,4	80	0,044	–	2,22	2,29	0,269	–
Этиловый спирт	30,6	80	0,033	–	2,36	1,94	0,269	–
Лесопильный цех: древесина	13,8	57	0,015	0,058	1,15	1,57	0,024	–
Цех дерево обработки: древесина	13,8	57	0,015	0,022	1,15	1,57	0,024	–
Цех сушки древесины: древесина	13,8	57	0,015	0,038	1,15	1,57	0,024	–
Производство фанеры: древесина и фанера (0,5+0,5)	16,1	81	0,012	0,019	1,18	1,06	0,072	–
Штабель древесины: хвойный и лиственный лес	13,8	57	0,015	0,059	1,15	1,57	0,024	–

Материал	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Дымообразующая способность, (Нп·м <sup>2</sup> )/кг	Удельная массовая скорость выгорания, кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный расход кислорода, кг/кг	Выделение токсичных продуктов горения, кг/кг		
						CO <sub>2</sub>	CO	HC1
Хвойные древесные строительные материалы: штабель	13,8	61	0,006	0,059	1,15	1,57	0,024	–
Лиственные древесные строительные материалы: штабель	13,8	53	0,014	0,059	1,15	1,57	0,024	–
Клееные строительные материалы: фанера	18,4	104	0,009	0,017	1,21	0,54	0,121	–
Сырье для легкой промышленности: хлопок разрыхленный	16,4	0,6	0,021	0,045	2,3	0,57	0,0052	–
Сырье для легкой промышленности: лен разрыхленный	15,7	3,4	0,021	0,05	1,83	0,36	0,0039	–

Материал	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Дымообразующая способность, (Нп·м <sup>2</sup> )/кг	Удельная массовая скорость выгорания, кг/{м <sup>2</sup> ·с}	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный расход кислорода, кг/кг	Выделение токсичных продуктов горения, кг/кг		
						CO <sub>2</sub>	CO	HC1
Сырье для легкой промышленности: хлопок и капрон (0,75+0,25)	15,7	4,3	0,013	0,028	3,55	1,05	0,012	–
Сырье для легкой промышленности: шерсть	21,8	164	0,02	0,028	1,76	0,72	0,015	–
Пищевая промышленность: пшеница, рис, гречиха и мука из них	17,0	1096	0,008	0,005	0,97	0,81	0,163	–
Сырье и изделия из синтетического каучука	43,0	212	0,011	0,014	2,99	1,41	0,15	0,005
Склад льноволокна	15,7	3,4	0,021	0,071	1,83	0,36	0,004	–
Склад хлопка в тюках	16,7	0,6	0,017	0,0042	1,15	0,58	0,0052	–

Материал	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Дымообразующая способность, (Нп·м <sup>2</sup> )/кг	Удельная массовая скорость выгорания, кг/{м <sup>2</sup> ·с}	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный расход кислорода, кг/кг	Выделение токсичных продуктов горения, кг/кг		
						СО <sub>2</sub>	СО	НС1
Склад бумаги: в рулонах	15,1	41	0,008	0,005	1,16	0,66	0,108	–
Провода в резиновой изоляции типа КПРТ. ПТ. ВПРС	37,8	850	0,192	0,005	2,99	0,42	0,015	–
Склад оргстекла (ПММА)	26,4	78	0,004	0,008	2,09	1,8	0,127	–
Кабели и провода: 0,75-(АВВГ. АПВГ. ТПВ) + 0,25 (КПРТ. ПР. ШРПС)	33,5	612	0,062	0,0054	2,39	0,66	0,1	0,014
Дерево и лакокрасочное покрытие: 0,95-древесина + 0,05- (ФЛ+РХО}	13,9	64	0,023	0,015	1,19	0,72	0,02	0,0005

Материал	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Дымообразующая способность, (Нп·м <sup>2</sup> )/кг	Удельная массовая скорость выгорания, кг/{м <sup>2</sup> ·с}	Линейная скорость распространения пламени, м/с	Удельный расход кислорода, кг/кг	Выделение токсичных продуктов горения, кг/кг		
						CO <sub>2</sub>	CO	HC1
Автомобиль: 0,3-(резина, бензин) + 0,15 ППУ. искусственная кожа ПВХ) + 0,1 эмаль	31,7	487	0,023	0,0068	2,64	1,3	0,097	0,011
Упаковочная тара: древесина, картон, полистирол (0,5К1.25+0,25)	20,7	155	0,018	0,01	1,52	0,97	0,094	0,0046
Упаковка: бумага, картон, полиэтилен и полистирол (0,4+0,3+0,15+0,15)	23,5	172	0,013	0,004	1,7	0,68	0,112	0,0037
Индустриальное масло	42,7	480	0,043	–	1,59	1,07	0,122	–
Вешала текстильных изделий	16,7	61	0,025	0,0078	256	0,88	0,063	–

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

**ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУХОГО ВОЗДУХА  
ПРИ ДАВЛЕНИИ 101325 ПА**

Температура, $t, ^\circ\text{C}$	Плотность, $\rho, \text{кг/м}^3$	Удельная теплоемкость, $C_p,$ $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	Коэффициент теплопроводности, $\lambda \cdot 10^2,$ $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$
-50	1,584	1,013	2,04
-40	1,515	1,013	2,12
-30	1,453	1,013	2,20
-20	1,395	1,009	2,28
-10	1,342	1,009	2,36
0	1,293	1,005	2,44
10	1,247	1,005	2,51
20	1,205	1,005	2,59
30	1,165	1,005	2,67
40	1,128	1,005	2,76
50	1,093	1,005	2,83
60	1,060	1,005	2,90
70	1,029	1,009	2,96
80	1,000	1,009	3,05
90	0,972	1,009	3,13
100	0,946	1,009	3,21
120	0,898	1,009	3,34
140	0,854	1,013	3,49
160	0,815	1,017	3,64
180	0,779	1,022	3,78
200	0,746	1,026	3,93
250	0,674	1,038	4,27
300	0,615	1,047	4,60
350	0,566	1,059	4,91
400	0,524	1,068	5,21

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

### ПРИМЕРЫ ЗАДАЧ

**Задача 1.** Определить параметры воздушной ударной волны и вероятную степень повреждения зданий от взрывной нагрузки, находящихся на расстоянии 80 м от места аварии, в результате разрыва автоцистерны, содержащей 8 т сжиженного пропана. Местность открытая, погода безветренная, температура наружного воздуха +20 °С. Средняя концентрация пропана в образовавшемся облаке составила  $\frac{2}{3}$  от верхнего концентрационного предела. Для оценки максимально возможных последствий принято, что в результате выброса газа в пределах воспламенения оказалось практически все топливо, перевозившееся в цистерне.

#### *Порядок решения*

1. По справочным данным определяем верхний концентрационный предел распространения пламени пропана с воздухом  $C_{ВКПР}$  ( $C_{ВКПР} = 9,4 \%$  (об)).

2. По выражению (82) производим перевод значений верхнего концентрационного предела распространения пламени из объемных концентраций в весовые и определяем среднюю концентрацию горючего в смеси при заданных условиях:

$$\begin{aligned} C_{ВКПР} &= 0,12 \cdot 10^{-2} \cdot C_a \cdot M \cdot P/T = 0,12 \cdot 10^{-2} \cdot \\ &\cdot 9,4 \cdot 44,1 \cdot 10325/293 = 172,03 \text{ г/м}^3; \\ C_{Г} &= 2/3 \cdot C_{ВКПР} = 115 \text{ г/м}^3 = 0,115 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

3. По выражению (81) определяем стехиометрическую концентрацию пропана в смеси с воздухом:

$$C_{СТ} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \beta} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 5} = 3,97 \% \text{ (об)} = 71,5 \text{ г/м}^3.$$

4. По справочным данным или по формуле (83) с использованием табл. 29 определяем удельную теплоту сгорания газа:

$$E_{y0} = 44 \cdot \beta = 44 \cdot 1,05 = 46,2 \text{ МДж/кг} = 4,62 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}.$$

5. В соответствии с пунктом 5.3 определяем вид окружающего пространства (класс IV).

6. По формуле (80) определяем эффективный энергозапас топливно-воздушной смеси (ТВС) (взрыв облака на поверхности земли). Так как  $C_{\Gamma} > C_{CT}$ , следовательно:

$$E = 2 \cdot M_{\Gamma} \cdot E_{уд} \frac{C_{CT}}{C_{\Gamma}} = 2 \cdot 8000 \cdot 4,62 \cdot 10^7 \cdot 0,0715 / 0,115 = 4,6 \cdot 10^{11} \text{ Дж.}$$

Исходя из классификации веществ (табл. 29), определяем, что пропан относится к классу 2 опасности (чувствительные вещества).

7. По экспертной табл. 30 определяем ожидаемый режим взрывного превращения облака ТВС – дефлаграция с диапазоном видимой скорости фронта пламени от 150 до 200 м/с.

8. Для проверки по соотношению (85) рассчитываем скорость фронта пламени:

$$u = k_1 \cdot M^{1/6} = 43 \cdot 8000^{1/6} = 192 \text{ м/с.}$$

Полученная величина меньше максимальной скорости диапазона данного взрывного превращения.

9. Для заданного расстояния (80 м) по выражению (87) рассчитываем безразмерное расстояние:

$$R_x = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}} = 80 / (4,6 \cdot 10^{11} / 101324)^{1/3} = 0,48;$$

$$R_x > R_{кр1};$$

$$0,48 > 0,34.$$

10. При значениях  $R_x > R_{кр1}$  величины безразмерного давления  $P_{x1}$  и импульса фазы сжатия  $I_{x1}$  при дефлаграционном сгорании газовой воздушной смеси определяем по формулам (94), (95) и (96):

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

$$= \left( \frac{192^2}{340^2} \right) \cdot \left( \frac{7-1}{7} \right) \cdot \left( \frac{0,83}{0,48} - \frac{0,14}{0,48^2} \right) = 0,307;$$

$$\begin{aligned}
 I_{x1} &= W(1-0,4W) \cdot \left( \frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right) = \\
 &= 0,484(1-0,4 \cdot 0,484) \cdot \left( \frac{0,06}{0,48} + \frac{0,01}{0,48^2} - \frac{0,0025}{0,48^3} \right) = 0,0566 \\
 W &= \frac{u}{C_0} \left( \frac{\sigma - I}{\sigma} \right) = \frac{192}{340} \left( \frac{7 - I}{7} \right) = 0,484.
 \end{aligned}$$

11. По найденным безразмерным величинам  $P_x$  и  $I_x$  по выражениям (92) и (93) вычисляем искомые величины избыточного давления и импульса фазы сжатия в воздушной ударной волне на расстоянии 80 м от места аварии при скорости горения 192 м/с:

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= P_x \cdot P_0 = 0,307 \cdot 101325 = 3,1 \cdot 10^4 \text{ Па}; \\
 I^+ &= I_x \cdot P_0^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0 = \\
 &= 0,057 \cdot 101325^{2/3} \cdot (4,6 \cdot 10^{11}) / 340 = 2,8 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot \text{с}.
 \end{aligned}$$

12. По формулам, приведенным в табл. 24, определяем с учетом выше полученных значений значения пробит-функции для различных степеней разрушения зданий на расстоянии 80 м от места аварии:

$$\begin{aligned}
 P_{r1} &= 5 - 0,26 \times \ln \left[ \left( \frac{4600}{\Delta P_\phi} \right)^{3,9} + \left( \frac{110}{I} \right)^{5,0} \right] = 6,93; \\
 P_{r2} &= 5 - 0,26 \times \ln \left[ \left( \frac{17500}{\Delta P_\phi} \right)^{8,4} + \left( \frac{290}{I} \right)^{9,3} \right] = 4,998; \\
 P_{r4} &= 5 - 0,22 \times \ln \left[ \left( \frac{40000}{\Delta P_\phi} \right)^{7,4} + \left( \frac{460}{I} \right)^{11,3} \right] = 4,585.
 \end{aligned}$$

13. По табл. 23 по значениям пробит-функций определяем вероятность повреждения зданий от взрывной нагрузки: слабые разрушения – 97 %, тяжелые разрушения – 50 %, полные разрушения – 34 %.

**Задача 2.** Оценить величину индивидуального и социального риска, обусловленных возможными пожарами на наружной установке, расположенной на территории производственного объекта в Кемеровской области.

В качестве наружной установки рассматривается резервуар для хранения бензина марки АИ-93 объемом  $10000 \text{ м}^3$  (диаметр резервуара 34,2 м, высота – 11,92 м) и трубопровод бензина (вход и выход продукта из резервуара осуществляются по одному патрубку) диаметром 250 мм и длиной трубопроводов 80 м.

Резервуар стальной вертикальный цилиндрический с купольной крышей без понтона. Резервуар имеет обвалование (огораживающую стену), рассчитанное на гидростатическое давление разлившейся жидкости. Площадь внутри обвалования составляет  $3500 \text{ м}^2$ .

Защита резервуара от нагрева, деформации и разрушения во время пожара осуществляется при помощи стационарных установок водяного орошения, в качестве которых предусматриваются кольца орошения.

### **Исходные данные для дальнейших расчетов**

#### **1. Физико-химические свойства обращающихся горючих веществ и материалов**

Свойства бензина принимались согласно данным, приведенным в прил. Б:

- суммарная формула –  $\text{C}_{6,911} \text{H}_{12,168}$ ;
- молярная масса – 95,3 кг/кмоль;
- температура вспышки –  $-37 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- константы уравнения Антуана в диапазоне температур –  $60 \div 90 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $A = 4,26511$ ,  $B = 695,019$ ,  $C_a = 223,220$ ;
- НКПР – 1,1 % (об.);
- усредненная плотность бензина АИ-93 –  $745 \text{ кг/м}^3$ .

#### **2. Статистические данные, необходимые для определения частоты реализации пожароопасных ситуаций**

**А.** Данные по частотам реализации иницирующих пожароопасные ситуации событий для резервуара (резервуар для хранения ЛВЖ при давлении, близком к атмосферному давлению).

нию со стационарной крышей при единичном объеме 450 м<sup>3</sup> и более) и трубопроводов принимаем в соответствии с табл. 1 и 2.

Частота разгерметизации резервуара с диаметром отверстия истечения 25 мм:

$$Q_{\text{разгерм.рез.25мм}} = 8,8 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

Частота разгерметизации резервуара с диаметром отверстия истечения 100 мм:

$$Q_{\text{разгерм.рез.100мм}} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

Частота полного разрушения резервуара:

$$Q_{\text{полн.разруш.рез.}} = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}.$$

Частота возникновения пожара на дыхательной арматуре резервуара:

$$Q_{\text{пож.дых.армат.рез.}} = 9,0 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1};$$

Частота возникновения пожара по всей поверхности резервуара:

$$Q_{\text{пож.поверх.рез.}} = 9,0 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

Частота разгерметизации трубопровода с диаметром отверстия истечения 12,5 мм:

$$Q_{\text{разгерм.труб.12,5}} = 1,1 \cdot 10^{-6} (\text{год} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Частота разгерметизации трубопровода с диаметром отверстия истечения 25 мм:

$$Q_{\text{разгерм.труб.25}} = 4,7 \cdot 10^{-7} (\text{год} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Частота разгерметизации трубопровода с диаметром отверстия истечения 50 мм:

$$Q_{\text{разгерм.труб.50}} = 1,9 \cdot 10^{-7} (\text{год} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Частота разгерметизации трубопровода с диаметром отверстия истечения 100 мм:

$$Q_{\text{разгерм.труб.100}} = 7,8 \cdot 10^{-8} (\text{год} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Частота разрыва трубопровода по полному сечению:

$$Q_{\text{разгерм.труб.разрыв}} = 1,5 \cdot 10^{-8} (\text{год} \cdot \text{м})^{-1}.$$

**Б.** Условные вероятности мгновенного воспламенения и условные вероятности последующего воспламенения при отсут-

ствии мгновенного, а также условные вероятности сгорания с образованием избыточного давления при образовании горючего газопаровоздушного облака и его последующем воспламенении в зависимости от типа утечки (массовый расход истечения, кг/с), кроме случаев полного разрушения резервуара и разрыва трубопроводов, принимались при дальнейших расчетах равными максимальным условным вероятностям (табл. 7) как для двухфазной среды.

Условную вероятность мгновенного воспламенения для утечек из резервуара и трубопроводов принимаем равной:

$$P_{\text{мг.воспл.утеч.}} = 0,150.$$

Условную вероятность последующего воспламенения при отсутствии мгновенного воспламенения для утечек из резервуара и трубопроводов принимаем равной:

$$P_{\text{посл.воспл.утеч.}} = 0,176.$$

Условную вероятность мгновенного воспламенения для случаев полного разрушения резервуара и полного разрыва трубопроводов принимаем равной:

$$P_{\text{мгн.воспл.разр.}} = 0,200.$$

Условную вероятность последующего воспламенения при отсутствии мгновенного воспламенения для случаев полного разрушения резервуара и полного разрыва трубопроводов принимаем равной:

$$P_{\text{посл.воспл.разр.}} = 0,240.$$

Условную вероятность сгорания с образованием избыточного давления при образовании паровоздушного облака и его последующем воспламенении для всех типов утечек из резервуара и трубопроводов принимаем равной:

$$P_{\text{обр.изб.давл.}} = 0,600.$$

**В.** Вероятность эффективной работы систем водяного орошения (кольца орошения) резервуара, согласно табл. 11, принимаем равной  $P_{op.} = 0,95$ .

**Г.** Метеорологические условия в районе местонахождения объекта.

Максимально возможная температура в климатической зоне размещения объекта (г. Кемерово) составляет  $37^{\circ}\text{C}$  [14]. Максимальная повторяемость штиля на территории г. Кемерово, согласно [15], составляет  $P_{штиля} = 0,12$ .

### **3. Анализ пожарной опасности объекта**

Аварии с пожарами и взрывами на объектах хранения нефти и нефтепродуктов имеют определенные закономерности возникновения и развития пожароопасных ситуаций, развивающиеся, как правило, по следующей схеме:

- происходит истечение горючих продуктов в окружающее пространство в результате нарушения герметичности арматуры или оборудования;

- вышедшие горючие продукты либо воспламеняются, либо создают обширную зону газопаровоздушной смеси с взрывоопасной концентрацией горючего;

- факторы возникшего пожара (взрыва) интенсивно воздействуют на единицу оборудования или трубопровод, из которого происходит истечение, а также на соседнее оборудование, трубопроводы и т. п., вследствие чего происходит их разрушение или разгерметизация;

- количество выходящего продукта и масштабы пожара возрастают со временем, последствия которого связаны с большим материальным ущербом и возможностью человеческих жертв.

В основу перечня пожароопасных ситуаций, пожаров и сценариев их развития положен метод логических деревьев событий, построение которых осуществлялось исходя из следующих предпосылок:

1. В качестве иницирующих пожароопасные ситуации и пожары на объекте рассматриваются следующие события: раз-

герметизация резервуара, разгерметизация трубопроводов бензина, возникновение пожаров на дыхательной арматуре резервуара и возникновение пожаров по всей поверхности резервуара.

2. Пожар на дыхательной арматуре резервуара приводит к возникновению пожара резервуара по всей поверхности с условной вероятностью 100 %.

3. Все случаи разгерметизации резервуара, характеризующиеся его полным разрушением, относятся к квазимгновенному разрушению резервуара, в результате чего происходит перелив части продукта через обвалование (ограждение).

4. Реализация иницирующих пожароопасные ситуации событий, связанных с разгерметизацией резервуара и трубопроводов, приводит к образованию пролива в пределах обвалования, а в случае полного разрушения резервуара также и к проливу вне обвалования.

5. При мгновенном воспламенении вышедшего горючего продукта возникает пожар пролива.

6. В случае отсутствия мгновенного воспламенения вышедшего горючего вещества происходит испарение бензина с поверхности пролива с возможностью образования взрывоопасного паровоздушного облака только в случае безветрия (штиля).

7. Последующее воспламенение при условии отсутствия мгновенного воспламенения приводит к взрыву образовавшегося паровоздушного облака или его сгоранию в режиме пожара-вспышки. При наличии ветра последующее воспламенение приводит к пожару пролива.

8. Воздействие пожара пролива бензина на резервуар при условии неэффективной работы (невыполнение задачи) системой водяного орошения резервуара приводит к возникновению пожара резервуара по всей поверхности.

На рисунках Д1–Д3 приведены деревья событий при возникновении и развитии пожароопасных ситуаций и пожаров, которые положены в основу расчетов по оценке пожарного риска для рассматриваемого резервуарного объекта. Возможность перехода ситуаций от стадии к стадии показана с использовани-

ем условных вероятностей  $P_1$ – $P_7$ , где:  $P_i$  – условная вероятность мгновенного воспламенения (табл. 7):

$$P_1 = P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} = 0,150, \text{ для утечек;}$$

$P_1 = P_{\text{мгн. воспл. разр.}} = 0,200$ , для случаев полного разрушения или полного разрыва.

$P_2$  – условная вероятность безветрия (штиля):

$$P_2 = P_{\text{штиля}} = 0,12.$$

$P_3$  – условная вероятность последующего воспламенения при отсутствии мгновенного воспламенения (табл. 7):

$$P_3 = P_{\text{посл. воспл. утеч.}} = 0,176, \text{ для утечек;}$$

$P_3 = P_{\text{посл. воспл. разр.}} = 0,240$ , для случаев полного разрушения или полного разрыва.

$P_4$  – условная вероятность сгорания с образованием избыточного давления при образовании паровоздушного облака и его последующем воспламенении (табл. 7):

$$P_4 = P_{\text{обр. изб. давл.}} = 0,600.$$

$P_5$  – условная вероятность эффективной работы систем водяного орошения резервуара при воздействии на него пожара пролива бензина в обваловании:

$$P_5 = P_{\text{ор}} = 0,95.$$

$P_6$  – условная вероятность эффективной работы системы водяного орошения резервуара при воздействии на него внешнего пожара:

$$P_6 = P_{\text{ор}} = 0,95.$$

$P_7$  – условная вероятность неэффективной работы системы водяного орошения резервуара при воздействии на него внешнего пожара:

$$P_7 = 1 - P_{\text{ор}} = 1 - 0,95 = 0,05.$$

Перечень рассматриваемых пожароопасных ситуаций и пожаров, а также сценариев их развития приведен в табл. Д1.

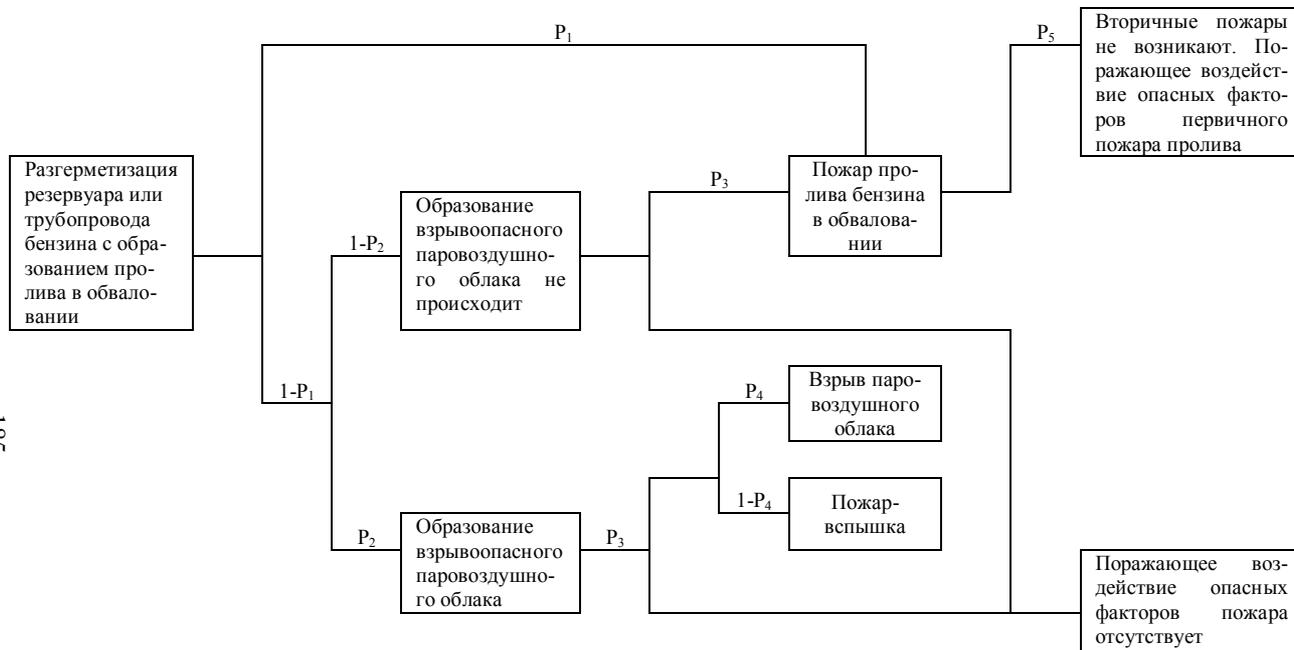


Рис. Д1. Дерево событий при возникновении и развитии пожароопасной ситуации, связанной с разгерметизацией резервуара или трубопровода рассматриваемого объекта





Рис. Д3. Дерево событий при возникновении и развитии пожароопасной ситуации, связанной с возникновением пожара полным разрушением резервуара рассматриваемого объекта

## Перечень пожароопасных ситуаций и пожаров и сценариев их развития

Наименование оборудования	Наименование пожароопасной ситуации пожара	Сценарий развития пожароопасной ситуации/ пожара	№ сценария
1	2	3	4
Резервуар хранения бензина	Разгерметизация резервуара, характеризующаяся диаметром отверстия истечения 25 мм	Пожар пролива бензина в обваловании без возникновения вторичных пожаров	1
		Пожар пролива бензина в обваловании с возникновением вторичного пожара резервуара 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 без возникновения вторичных пожаров	5
		Пожар пролива бензина в обваловании с возникновением вторичного пожара резервуара 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 и пролива перелившегося через обвалование бензина без возникновения вторичных пожаров	9
		Взрыв паровоздушного облака	10
		Сгорание паровоздушного облака в режиме пожара-вспышки	11

1	2	3	4
Резервуар хранения бензина	Возникновение пожара резервуара по всей поверхности	Пожар резервуара по всей поверхности без возникновения вторичного пожара	12
		Пожар резервуара по всей поверхности с возникновением вторичного пожара по всей поверхности	13
	Возникновение пожара на дыхательной арматуре	Пожар резервуара по всей поверхности без возникновения вторичного пожара	14
		Пожар резервуара по всей поверхности с возникновением вторичного пожара по всей поверхности	15
Трубопроводы бензина	Разгерметизация трубопровода, характеризующаяся диаметром отверстия истечения 12,5 мм	Пожар пролива бензина в обваловании без возникновения вторичных пожаров	16
		Пожар пролива бензина в обваловании с возникновением вторичного пожара резервуара по всей поверхности	17
		Взрыв паровоздушного облака	18
		Сгорание паровоздушного облака в режиме пожара-вспышки	19
	Разгерметизация трубопровода, характеризующаяся диаметром отверстия истечения 25 мм	Пожар пролива бензина в обваловании без возникновения вторичных пожаров	20
		Пожар пролива бензина в обваловании с возникновением вторичного пожара резервуара по всей поверхности	21
		Взрыв паровоздушного облака	22
		Сгорание паровоздушного облака в режиме пожара-вспышки	23
	Разгерметизация трубопровода, характеризующаяся диаметром отверстия истечения 50 мм	Пожар пролива бензина в обваловании без возникновения вторичных пожаров	24
		Пожар пролива бензина в обваловании с возникновением вторичного пожара резервуара по всей поверхности	25
		Взрыв паровоздушного облака	26
		Сгорание паровоздушного облака в режиме пожара-вспышки	27

1	2	3	4
Трубопроводы бензина	Разгерметизация трубопровода, характеризующаяся диаметром отверстия истечения 100 мм	Пожар пролива бензина в обваловании без возникновения вторичных пожаров	28
		Пожар пролива бензина в обваловании с возникновением вторичного пожара резервуара по всей поверхности	29
		Взрыв паровоздушного облака	30
		Сгорание паровоздушного облака в режиме пожара-вспышки	31
	Разгерметизация трубопровода, характеризующаяся разрывом по полному сечению	Пожар пролива бензина в обваловании без возникновения вторичных пожаров	32
		Пожар пролива бензина в обваловании с возникновением вторичного пожара резервуара по всей поверхности	33
		Взрыв паровоздушного облака	34
		Сгорание паровоздушного облака в режиме пожара-вспышки	35

#### 4. Определение частоты реализации пожароопасных ситуаций

Частоты реализации сценариев развития рассматриваемых пожароопасных ситуаций и пожаров (табл. Д1) определялись в соответствии с деревьями событий (рис. Д1–Д3).

*Частоты реализации сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров, возникающих на резервуаре (1–13).*

Частота реализации сценария № 1 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_1 = Q_{\text{разгорм. рез. 25 мм}} \cdot P_{\text{ор}} \cdot \left( P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штыля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \right) = 8,8 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = 2,3 \cdot 10^{-5}.$$

Частота реализации сценария № 2 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_2 = Q_{\text{разгорм. рез. 25 мм}} \cdot (1 - P_{\text{ор}}) \cdot P_{\text{ор}} \cdot \left( P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штыля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \right) = 8,8 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,95) \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = 1,2 \cdot 10^{-6}.$$

Частота реализации сценария № 3 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_3 = Q_{\text{разгорм. рез. 25 мм}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{штыля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot P_{\text{обр. изб. давл.}} = 8,8 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot 0,600 = 9,5 \cdot 10^{-7}.$$

Частота реализации сценария № 4 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_4 = Q_{\text{разгорм. рез. 25 мм}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{штыля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot (1 - P_{\text{обр. изб. давл.}}) = 8,8 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot (1 - 0,600) = 6,3 \cdot 10^{-7}.$$

Частота реализации сценария № 5 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_5 = Q_{\text{разгорм. рез. 100 мм}} \cdot P_{\text{ор}} \cdot \left( P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штыля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \right) = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = 3,3 \cdot 10^{-6}.$$

Частота реализации сценария № 6 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_6 = Q_{\text{разггерм. рез. 100 мм}} \cdot (1 - P_{\text{ор}}) \cdot P_{\text{ор}} \cdot \\ \cdot (P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штиля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}}) = \\ = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,95) \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = 1,6 \cdot 10^{-7}.$$

Частота реализации сценария № 7 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_7 = Q_{\text{разггерм. рез. 100 мм}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{штиля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot P_{\text{обр. изб. давл.}} = \\ = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot 0,600 = 1,3 \cdot 10^{-7}.$$

Частота реализации сценария № 8 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_8 = Q_{\text{разггерм. рез. 100 мм}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{штиля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot \\ \cdot (1 - P_{\text{обр. изб. давл.}}) = 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot (1 - 0,600) = \\ = 8,6 \cdot 10^{-8}.$$

Частота реализации сценария № 9 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_9 = Q_{\text{полн. разруш. рез.}} \cdot P_{\text{ор}} \cdot \\ \cdot (P_{\text{мгн. воспл. разр.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. разр.}}) \cdot (1 - P_{\text{штиля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. разр.}}) = \\ = 5,0 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95 \cdot (0,200 + (1 - 0,200) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,240) = 1,8 \cdot 10^{-6}.$$

Частота реализации сценария № 10 (год<sup>-1</sup>):

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

Частота реализации сценария № 11 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{11} = Q_{\text{полн. разруш. рез.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. разр.}}) \cdot P_{\text{штиля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. разр.}} \cdot \\ \cdot (1 - P_{\text{обр. изб. давл.}}) = 5,0 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0,200) \cdot 0,12 \cdot 0,240 \cdot (1 - 0,600) = \\ = 4,6 \cdot 10^{-8}.$$

Частота реализации сценария № 12 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{12} = Q_{\text{пож.поверх.рез.}} \cdot P_{\text{ор.}} = 9,0 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 = 8,6 \cdot 10^{-5}.$$

Частота реализации сценария № 13 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{13} = Q_{\text{пож.дых.армат.рез.}} \cdot P_{\text{ор.}} = 9,0 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 = 8,6 \cdot 10^{-5}.$$

*Частоты реализации сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров, возникающих в результате разгерметизации трубопроводов (1–35).*

Частота реализации сценария № 14 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{14} = Q_{\text{разгерм.труб.12,5мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot P_{\text{ор.}} \cdot (P_{\text{мгн.воспл.утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн.воспл.утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штыля}}) \cdot P_{\text{посл.воспл.утеч.}}) = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = 2,3 \cdot 10^{-5}.$$

Частота реализации сценария № 15 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{15} = Q_{\text{разгерм.труб.12,5мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{ор.}}) \cdot P_{\text{ор.}} \cdot (P_{\text{мгн.воспл.утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн.воспл.утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штыля}}) \cdot P_{\text{посл.воспл.утеч.}}) = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot (1 - 0,95) \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = 1,2 \cdot 10^{-6}.$$

Частота реализации сценария № 16 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{16} = Q_{\text{разгерм.труб.12,5мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн.воспл.утеч.}}) \cdot P_{\text{штыля}} \cdot P_{\text{посл.воспл.утеч.}} \cdot P_{\text{обр.изб.дав.}} = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot 0,600 = 9,5 \cdot 10^{-7}.$$

Частота реализации сценария № 17(год<sup>-1</sup>):

$$Q_{17} = Q_{\text{разгерм.труб.12,5мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн.воспл.утеч.}}) \cdot P_{\text{штыля}} \cdot P_{\text{посл.воспл.утеч.}} \cdot (1 - P_{\text{обр.изб.дав.}}) = 1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 80 \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot (1 - 0,600) = 6,3 \cdot 10^{-7}.$$

Частота реализации сценария № 18 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{18} &= Q_{\text{разгерм. труб. 25 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot P_{\text{ор}} \cdot \\
 &\cdot (P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штиля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}}) = \\
 &= 4,7 \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = \\
 &= 1,0 \cdot 10^{-5}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 19 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{19} &= Q_{\text{разгерм. труб. 25 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{ор}}) \cdot P_{\text{ор}} \cdot \\
 &\cdot (P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штиля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}}) = \\
 &= 4,7 \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot (1 - 0,95) \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = \\
 &= 5,0 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 20 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{20} &= Q_{\text{разгерм. труб. 25 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{штиля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot \\
 &\cdot P_{\text{обр. изб. давл.}} = 4,7 \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot 0,600 = 4,0 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 21 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{21} &= Q_{\text{разгерм. труб. 25 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{штиля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot \\
 &\cdot (1 - P_{\text{обр. изб. давл.}}) = 4,7 \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot (1 - 0,600) = \\
 &= 2,7 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 22 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{22} &= Q_{\text{разгерм. труб. 50 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot P_{\text{ор}} \cdot \\
 &\cdot (P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штиля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}}) = \\
 &= 1,9 \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = 4,1 \cdot 10^{-6}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 23 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{23} &= Q_{\text{разггерм. труб. 50 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{ор}}) \cdot P_{\text{ор}} \cdot \\
 &\cdot \left( P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штыля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \right) = \\
 &= 1,9 \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot (1 - 0,95) \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = \\
 &= 2,0 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 24 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{24} &= Q_{\text{разггерм. труб. 50 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{штыля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot \\
 &\cdot P_{\text{обр. изб. давл.}} = 1,9 \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot 0,600 = 1,6 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 25 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{25} &= Q_{\text{разггерм. труб. 50 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{штыля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot \\
 &\cdot (1 - P_{\text{обр. изб. давл.}}) = 1,9 \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot (1 - 0,600) = \\
 &= 1,1 \cdot 10^{-7}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 26 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{26} &= Q_{\text{разггерм. труб. 100 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot P_{\text{ор}} \cdot \\
 &\cdot \left( P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штыля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \right) = \\
 &= 7,8 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = 1,7 \cdot 10^{-6}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 27 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{27} &= Q_{\text{разггерм. труб. 100 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{ор}}) \cdot P_{\text{ор}} \cdot \\
 &\cdot \left( P_{\text{мгн. воспл. утеч.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot (1 - P_{\text{штыля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \right) = \\
 &= 7,8 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot (1 - 0,95) \cdot 0,95 \cdot (0,150 + (1 - 0,150) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,176) = \\
 &= 8,3 \cdot 10^{-8}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 28 (год<sup>-1</sup>):

$$\begin{aligned}
 Q_{28} &= Q_{\text{разггерм. труб. 100 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{штыля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot \\
 &\cdot P_{\text{обр. изб. давл.}} = 7,8 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot 0,600 = 6,7 \cdot 10^{-8}.
 \end{aligned}$$

Частота реализации сценария № 29 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{29} = Q_{\text{разггерм. труб. 100 мм}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. утеч.}}) \cdot P_{\text{итиля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. утеч.}} \cdot (1 - P_{\text{обр. изб. давл.}}) = 7,8 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot (1 - 0,150) \cdot 0,12 \cdot 0,176 \cdot (1 - 0,600) = 4,5 \cdot 10^{-8}.$$

Частота реализации сценария № 30 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{30} = Q_{\text{разггерм. труб. разрыв.}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot P_{\text{ор}} \cdot (P_{\text{мгн. воспл. разр.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. разр.}}) \cdot (1 - P_{\text{итиля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. разр.}}) = 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot 0,95 \cdot (0,200 + (1 - 0,200) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,240) = 4,1 \cdot 10^{-7}.$$

Частота реализации сценария № 31 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{31} = Q_{\text{разггерм. труб. разрыв.}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{ор}}) \cdot P_{\text{ор}} \cdot (P_{\text{мгн. воспл. разр.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. разр.}}) \cdot (1 - P_{\text{итиля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. разр.}}) = 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot (1 - 0,95) \cdot 0,95 \cdot (0,200 + (1 - 0,200) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,240) = 2,1 \cdot 10^{-8}.$$

Частота реализации сценария № 32 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{32} = Q_{\text{разггерм. труб. разрыв.}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot P_{\text{ор}} \cdot (1 - P_{\text{ор}}) \cdot (P_{\text{мгн. воспл. разр.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. разр.}}) \cdot (1 - P_{\text{итиля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. разр.}}) = 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot 0,95 \cdot (1 - 0,95) \cdot (0,200 + (1 - 0,200) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,240) = 2,1 \cdot 10^{-8}.$$

Частота реализации сценария № 33 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{33} = Q_{\text{разггерм. труб. разрыв.}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{ор}}) \cdot (1 - P_{\text{ор}}) \cdot (P_{\text{мгн. воспл. разр.}} + (1 - P_{\text{мгн. воспл. разр.}}) \cdot (1 - P_{\text{итиля}}) \cdot P_{\text{посл. воспл. разр.}}) = 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot (1 - 0,95) \cdot (1 - 0,95) \cdot (0,200 + (1 - 0,200) \cdot (1 - 0,12) \cdot 0,240) = 1,1 \cdot 10^{-9}.$$

Частота реализации сценария № 34 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{34} = Q_{\text{разгерм. труб. разрыв}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. разр.}}) \cdot P_{\text{штиля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. разр.}} \cdot P_{\text{обр. изб. давл.}} = 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot (1 - 0,200) \cdot 0,12 \cdot 0,240 \cdot 0,600 = 1,7 \cdot 10^{-8}.$$

Частота реализации сценария № 35 (год<sup>-1</sup>):

$$Q_{35} = Q_{\text{разгерм. труб. разрыв}} \cdot L_{\text{труб.}} \cdot (1 - P_{\text{мгн. воспл. разр.}}) \cdot P_{\text{штиля}} \cdot P_{\text{посл. воспл. разр.}} \cdot (1 - P_{\text{обр. изб. давл.}}) = 1,5 \cdot 10^{-8} \cdot 80 \cdot (1 - 0,200) \cdot 0,12 \cdot 0,240 \cdot (1 - 0,600) = 1,1 \cdot 10^{-8}.$$

### **5. Построение полей опасных факторов пожара для различных сценариев его развития**

Для рассматриваемых сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров учитываются следующие опасные факторы пожара:

- тепловое излучение при пожарах проливов и пожарах резервуара по всей поверхности;
- избыточное давление и импульс волны давления при сгорании паровоздушного облака в открытом пространстве;
- расширяющиеся продукты сгорания при реализации пожара-вспышки.

#### *5.1. Количественная оценка массы горючих веществ, поступающих в окружающее пространство в результате возникновения пожароопасных ситуаций*

Количество поступившего в окружающее пространство горючего продукта (бензина) при реализации пожароопасных ситуаций, связанных с разгерметизацией резервуара и трубопроводов рассматриваемого объекта, определялось исходя из следующих предпосылок.

1. Принималось, что разгерметизация трубопроводов (для всех типов утечек) и разгерметизация резервуара (для всех типов утечек, кроме полного разрушения) приводят к истечению всего содержимого в резервуаре бензина с образованием пролива, ограниченного обвалованием. При расчете количества испа-

рившегося с поверхности пролива бензина площадь поверхности испарения  $F_{RI}$  консервативно оценивалась площадью внутри обвалования и принималась равной  $3500 \text{ м}^2$ .

2. Площадь пролива бензина за пределами обвалования в случае полного разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование оценивалась в соответствии с п. 4.2.2 следующим образом.

Высота обвалования составляет:  $a = 3,5 \text{ м}$ .

Начальная высота столба жидкости в резервуаре  $h_0$  (м) определялась как отношение объема хранимого в резервуаре бензина ( $V_{рез.} = 10000 \text{ м}^3$ ) к площади днища резервуара (диаметр резервуара:  $D_{рез} = 34,2 \text{ м}$ ). Таким образом,

$$h_0 = \frac{V_{рез.}}{\pi \cdot \left(\frac{D_{рез.}}{2}\right)^2} = 10,9.$$

Значение параметра  $a/h_0$  составляет 0,32.

Доля перелившегося через обвалование бензина определялась по рис. 9 и была принята равной 38 %. Таким образом, количество перелившегося через обвалование бензина ( $\text{м}^3$ ) составляет:

$$V_{бен. перелив.} = 10000 \cdot 0,38 = 3800.$$

Площадь пролива указанного выше количества бензина за пределами обвалования  $F_{ПРХ}$  ( $\text{м}^2$ ) рассчитывалась по формуле (61). Коэффициент разлития  $f_p$  принимался равным  $20 \text{ м}^{-1}$ .

$$F_{ПРХ} = f_p \cdot V_{бен. перелив.} = 20 \cdot 3800 = 76000.$$

Обвалование (ограждение) имеет форму прямоугольника, периметр которого составляет  $L_{перим.} = 350 \text{ м}$ . При определении формы пролива бензина за пределами обвалования принималось,

что перелившееся через обвалование количество распределено вдоль всего обвалования в полосе шириной  $X$ , м (рис. Д4).

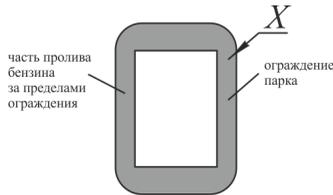


Рис. Д4. Схема к определению формы пролива бензина за пределами обвалования

Ширина  $X$ , м, определяется уравнением:

$$X \cdot L_{\text{перим.}} + \pi \cdot X^2 = F_{\text{ПРХ}}.$$

Следовательно, ширина  $X$  (м) составляет:

$$X = \frac{-L_{\text{перим.}}}{\pi} + \sqrt{\frac{L_{\text{перим.}}^2}{\pi^2} + 4 \cdot \frac{F_{\text{ПРХ}}}{\pi}} = 109,5.$$

**3.** При расчете количества испарившегося с поверхности пролива бензина для пожароопасных ситуаций, связанных с полным разрушением резервуара и переливом части бензина через обвалование, площадь поверхности испарения ( $\text{м}^2$ ) принималась равной:

$$F_{R2} = F_{R1} + F_{\text{ПРХ}} = 3500 + 76000 = 79500.$$

**4.** Продолжительность испарения бензина с поверхности пролива для всех пожароопасных ситуаций, связанных с разгерметизацией резервуара или трубопроводов, консервативно принималась:  $T = 3600$ , с (п. 4.2.1 пункт е).

Ниже приведены результаты расчета массы паров бензина поступивших в атмосферу в результате испарения с поверхности рассматриваемых проливов бензина.

Давление насыщенного пара (кПа) бензина при расчетной температуре составляет (65):

$$P_H = 10^{\left( A - \frac{B}{t_p + C_A} \right)} = 10^{\left( 4,26511 - \frac{695,019}{37 + 223,220} \right)} = 39,3.$$

Молярная масса бензина  $M = 95,3$  кг/кмоль.

Согласно п. 4.2.4, интенсивность испарения бензина (кг/(м<sup>2</sup>·с)) определяется по формуле (70):

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_H = 10^{-6} \cdot 1 \cdot \sqrt{95,3} \cdot 39,3 = 3,84 \cdot 10^{-4}.$$

Таким образом, масса паров бензина (кг), поступивших в атмосферу в результате испарения с поверхности рассматриваемых проливов бензина, составляет (69):

– для пролива бензина в пределах обвалования:

$$M_1 = F_{R1} \cdot W \cdot T = 3500 \cdot 3,84 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 = 4838,5.$$

– для случая пролива в результате полного разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование:

$$M_{21} = F_{R2} \cdot W \cdot T = 79500 \cdot 3,84 \cdot 10^{-4} \cdot 3600 = 109900,8.$$

## 5.2. Расчет интенсивности теплового излучения рассматриваемых пожаров

Интенсивность теплового излучения пожаров для рассматриваемых сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров, связанных с возникновением пожаров пролива бензина и пожаров резервуаров хранения бензина по всей поверхности, рассчитывалась по методу, приведенному в разделе 6 и позволяющему рассчитывать интенсивность теплового излучения ( $q$ ) по

жара пролива заданного горючего продукта с очагом (проливом) заданной площади ( $F$ ) на различных расстояниях от очага пожара.

Для сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров, связанных с возникновением пожаров: пожар пролива в обваловании без возникновения вторичных пожаров, пожар пролива в обваловании с возникновением вторичных пожаров резервуара, пожар резервуара по всей поверхности с возникновением вторичного пожара. При расчете интенсивности теплового излучения пожаров площадь очага пожара (площадь пролива)  $F_1$  принималась равной площади внутри обвалования ( $F_1 = 3500 \text{ м}^2$ ).

При расчете интенсивности теплового излучения для сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров, связанных с пожарами пролива бензина в обваловании и пролива перелившегося через обвалование бензина как без возникновения вторичных пожаров, так и с возникновением вторичных пожаров, площадь очага пожара (площадь пролива)  $F_2$  принималась равной площади  $F_{R2}$ , то есть принималась равной  $F_2 = 79500 \text{ м}^2$ .

Площадь очага пожара (площадь пролива) ( $\text{м}^2$ ) в случае пожара резервуара (диаметр резервуара 34,2 м) по всей поверхности принималась равной:

$$F_3 = \pi \cdot \frac{34,2^2}{4} = 918,6.$$

Результатом расчета интенсивности теплового излучения пожара для соответствующего сценария является получение зависимости интенсивности теплового излучения от расстояния до очага пожара. Для расчета интенсивности теплового излучения целесообразно использование вычислительной техники и соответствующих программных продуктов, позволяющих определять и хранить в памяти указанные зависимости для каждого из рассматриваемых сценариев.

Для демонстрации расчета интенсивности теплового излучения пожара ниже приведен расчет интенсивности теплового излучения пожара пролива бензина площадью  $F_3$  (пожар резер-

вуара по всей поверхности) в точке, расположенной на расстоянии  $r = 20$  м от границы очага пожара.

Эффективный диаметр пролива  $d$  (м) рассчитывается в соответствии с формулой (117) и составляет:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 918,6}{\pi}} = 34,2.$$

Удельная массовая скорость выгорания бензина согласно табл. 31 принималась равной:  $m = 0,06$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Плотность окружающего воздуха при расчетной температуре согласно (64)  $\rho_a = 1,15$  кг/м<sup>3</sup>, ускорение свободного падения  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Высота (длина) пламени  $L$  (м) определяется по формуле (119) при  $u_* < 1$  (м/с):

$$u_* = \frac{w_0}{\sqrt[3]{\frac{m \cdot g \cdot d}{\rho_{\text{бенз АИ93}}}}} = \frac{0,12}{\sqrt[3]{\frac{0,06 \cdot 9,81 \cdot 34,2}{3,744}}} = 0,07 < 1.$$

Угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра  $\theta$  рассчитывается по формуле (121):

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

$$L = 42 \cdot d \cdot \left[ \frac{m}{\rho_a \cdot \sqrt{g \cdot d}} \right]^{0,61} = 42 \cdot 34,2 \cdot \left[ \frac{0,06}{1,15 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 34,2}} \right]^{0,61} = 40,2.$$

Расстояние  $X$  (м) от геометрического центра пролива до облучаемого объекта находится следующим образом:

$$X = X_0 + 0,5 \cdot d = 20 + 0,5 \cdot 34,2 = 37,1.$$

Параметры  $a, b, B, A, C, D, E, F$  определяются по формулам (109–116):

$$a = \frac{2 \cdot L}{d} = \frac{2 \cdot 40,2}{34,2} = 2,35;$$

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

$$\begin{aligned} A &= \sqrt{(a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b+1) \cdot \sin \theta)} = \\ &= \sqrt{(2,35^2 + (2,17+1)^2 - 2 \cdot 2,35 \cdot (2,17+1) \cdot \sin 90^\circ)} = \sqrt{(2,35^2 + 3,17^2)} = 3,95; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B &= \sqrt{(a^2 + (b-1)^2 - 2 \cdot a \cdot (b-1) \cdot \sin \theta)} = \\ &= \sqrt{(2,35^2 + (2,17-1)^2 - 2 \cdot 2,35 \cdot (2,17-1) \cdot \sin 90^\circ)} = \sqrt{(2,35^2 + 1,17^2)} = 2,04; \end{aligned}$$

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

$$D = \sqrt{\left(\frac{b-1}{b+1}\right)} = \sqrt{\left(\frac{2,17-1}{2,17+1}\right)} = 0,6;$$

$$E = \frac{a \cdot \cos \theta}{b - a \cdot \sin \theta} = \frac{2,35 \cdot 1}{2,17 - 0} = 1,08;$$

$$F = \sqrt{(b^2 - 1)} = \sqrt{(2,17^2 - 1)} = 1,92.$$

Значение фактора облученности для вертикальной площадки  $F_V$ , определяемое формулой (107), составляет:

$$\begin{aligned}
F_V &= \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} &(-E \cdot \operatorname{arctg}(D)) + \\ &\left( E \cdot \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot b \cdot (1 + a \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) \right) + \\ &\left( \frac{\cos \theta}{C} \cdot \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} = \\
&= \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} &(-1,08 \cdot \operatorname{arctg}(0,6)) + \\ &\left( 1,08 \cdot \left[ \frac{2,35^2 + (2,17+1)^2 - 2 \cdot 2,17 \cdot (1 + 2,35 \cdot \sin 90^0)}{3,95 \cdot 2,04} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{3,95 \cdot 0,6}{2,04} \right) \right) + \\ &\left( \frac{\cos 90^0}{2,17} \cdot \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{2,35 \cdot 2,17 - 1,92^2 \cdot \sin 90^0}{1,92 \cdot 2,17} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{1,92^2 \cdot \sin 90^0}{1,92 \cdot 2,17} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} = \\
&= 0,356.
\end{aligned}$$

Значение фактора облученности для горизонтальной площадки  $F_H$ , определяемое формулой (108), составляет:

$$\begin{aligned}
F_H &= \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\operatorname{arctg} \left( \frac{1}{D} \right) + \\ &\left( \frac{\sin \theta}{C} \cdot \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{a \cdot b - F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{F^2 \cdot \sin \theta}{F \cdot C} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} - \\
&\quad \left( \left[ \frac{a^2 + (b+1)^2 - 2 \cdot (b+1 + a \cdot b \cdot \sin \theta)}{A \cdot B} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{A \cdot D}{B} \right) \right) \\
&= \frac{1}{\pi} \cdot \left\{ \begin{aligned} &\operatorname{arctg} \left( \frac{1}{0,6} \right) + \\ &\left( \frac{\sin 90^0}{2,17} \cdot \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{2,35 \cdot 2,17 - 1,92^2 \cdot \sin 90^0}{1,92 \cdot 2,17} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{1,92^2 \cdot \sin 90^0}{1,92 \cdot 2,17} \right) \right] \right) \end{aligned} \right\} - \\
&\quad \left( \left[ \frac{2,35^2 + (2,17+1)^2 - 2 \cdot (2,17+1 + 2,35 \cdot 2,17 \cdot \sin 90^0)}{3,95 \cdot 2,04} \right] \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{3,95 \cdot 0,6}{2,04} \right) \right) \\
&= 0,266.
\end{aligned}$$

Угловой коэффициент облученности  $F_q$  определяется по формуле (106):

$$F_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2} = \sqrt{0,356^2 + 0,256^2} = 0,444.$$

Коэффициент пропускания атмосферы  $\tau$  для пожара пролива определяется по формуле (122):

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

Среднеповерхностная интенсивность теплового излучения пламени  $E_f$  принимается в соответствии с табл. 31. Для рассматриваемого случая (диаметр пролива (очага пожара) – 34,2 м)  $E_f$  находится методом линейной интерполяции приведенных в указанной таблице значений по значениям для диаметров очага 30 м и 40 м и составляет  $E_f = 32,06$  кВт/м.

Таким образом, интенсивность теплового излучения (кВт/м<sup>2</sup>) пожара пролива бензина площадью  $F_3$  в точке, расположенной на расстоянии 20 м от границы очага пожара, согласно формуле (102) составляет:

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau = 32,06 \cdot 0,444 \cdot 0,986 = 14,03.$$

Аналогичным образом были получены зависимости интенсивности теплового излучения пожаров для рассматриваемых сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров, связанных с возникновением пожаров пролива бензина и пожаров резервуаров хранения бензина по всей поверхности, от расстояний до очага пожара. Графики указанных зависимостей приведены на рис. Д5, Д6 и Д7.

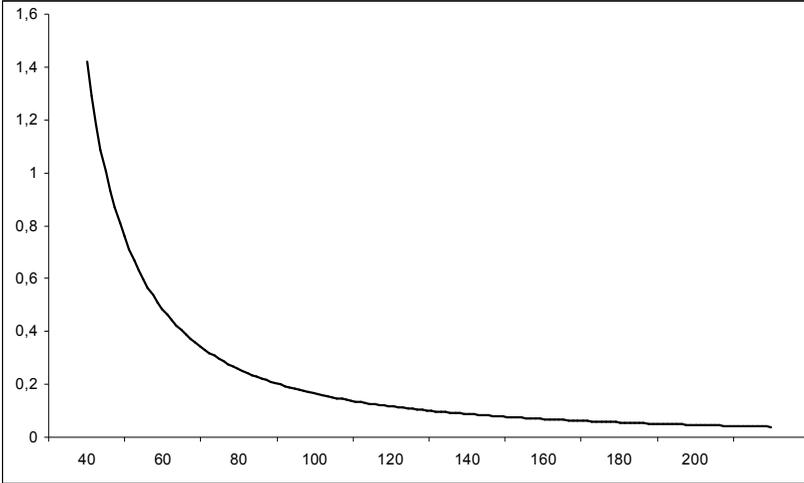


Рис. Д5. Зависимость интенсивности теплового излучения пожара пролива бензина от расстояния до очага пожара при площади очага пожара  $F_1 = 3500 \text{ м}^2$

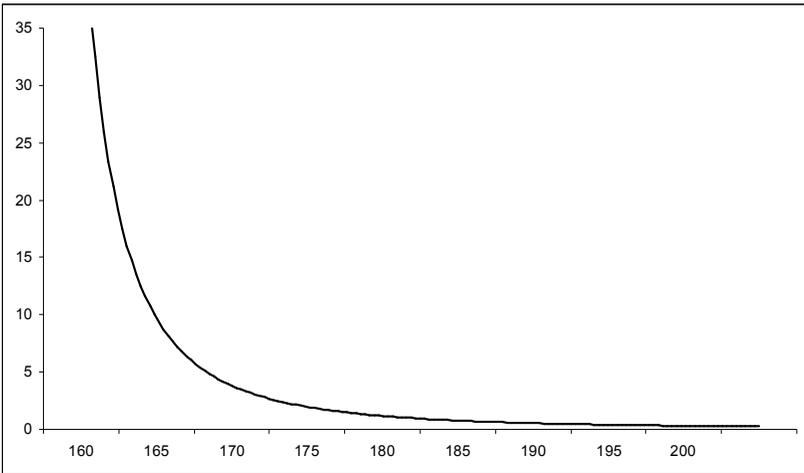


Рис. Д6. Зависимость интенсивности теплового излучения пожара пролива бензина от расстояния до очага пожара при площади очага пожара  $F_2 = 79500 \text{ м}^2$

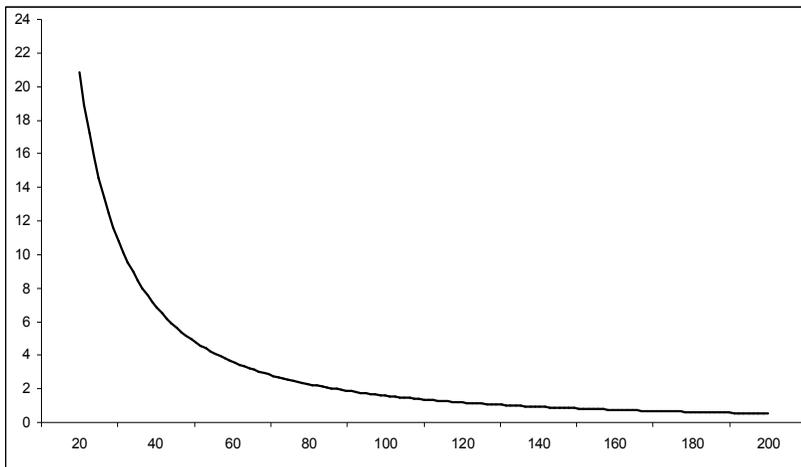


Рис. Д7. Зависимость интенсивности теплового излучения пожара пролива бензина от расстояния до очага пожара при площади очага пожара  $F_3 = 918,6 \text{ м}^2$

### 5.3. Расчет максимальных горизонтальных размеров взрывоопасных зон

Плотность паров бензина ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ) при расчетной температуре определялась по формуле (64) и составляет:

$$\rho_{\text{бенз АИ93}} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_0)} = \frac{95,3}{22,413 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 37)} = 3,744.$$

Горизонтальный размер взрывоопасной зоны, отсчитываемый от границы пролива, составляет:

– горизонтальный размер взрывоопасной зоны (м), образующейся в результате испарения с поверхности пролива бензина в пределах обвалования:

$$R_{\text{НКПР}} = 7,8 \cdot \left( \frac{M_1}{\rho_{\text{бенз АИ93}} \cdot C_{\text{НКПР}}} \right)^{0,33} = 7,8 \cdot \left( \frac{4838,4}{3,744 \cdot 1,1} \right)^{0,33} = 80,34.$$

– горизонтальный размер взрывоопасной зоны (м), образующейся в результате испарения с поверхности пролива полного разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование:

$$R2_{НКПР} = 7,8 \cdot \left( \frac{M_2}{\rho_{\text{бенз ЛИ93}} \cdot C_{НКПР}} \right)^{0,33} = 7,8 \cdot \left( \frac{1099008}{3,744 \cdot 1,1} \right)^{0,33} = 225,30.$$

#### *5.4. Определение параметров волны давления при сгорании паровоздушного облака*

Расчет зависимости параметров волны давления (избыточное давление и импульс) при сгорании паровоздушных облаков, образующихся в результате испарения бензина с поверхности рассматриваемых проливов бензина: пролив бензина в пределах обвалования и пролив в результате полного разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование, от расстояния производился в соответствии с разделом 5 (п. 5.5).

Результатом определения параметров волны давления при сгорании паровоздушного облака для соответствующего сценария является получение зависимости избыточного давления и импульса волны давления от расстояния до центра облака, таким образом, для расчета параметров волны давления при сгорании паровоздушного облака целесообразно использование вычислительной техники и соответствующих программных продуктов, позволяющих определять и хранить в памяти указанные зависимости для каждого из рассматриваемых сценариев.

Для демонстрации расчета параметров волны давления при сгорании паровоздушного облака, проведенного в соответствии с разделом 5 (п. 5.5), ниже приведен расчет избыточного давления и импульса волны давления при сгорании паровоздушного облака, образовавшегося в результате испарения бензина с поверхности пролива бензина в пределах обвалования с поступлением в атмосферу массы паров бензина  $M_1 = 4838,4$  кг, в точке, расположенной на расстоянии 80 м от обвалования.

По классификации веществ, способных к образованию горючих смесей с воздухом, бензин в соответствии с табл. 29 относится к классу 3. Характер загроможденности окружающего пространства для резервуара в соответствии с п. 5.3 соответствует классу III. Таким образом, согласно табл. 30, ожидаемый режим сгорания паровоздушного облака – дефлаграция, скорость фронта пламени 150–200 м/с.

Видимая скорость фронта пламени  $u$  (м/с) определяется для рассматриваемого режима по формуле (85) и составляет:

$$u = k_1 \cdot M^{1/6} = 43 \cdot 4838,4^{1/6} = 176,84.$$

Полученная величина не превосходит максимальной скорости, соответствующей данному классу (200 м/с), следовательно, принимается  $u = 200$  м/с.

Обвалование имеет прямоугольную форму (62 м  $\times$  113 м). Центр облака совпадает с геометрическим центром пролива – центром обвалования. Расстояние от рассматриваемой точки до центра облака принималось равным сумме расстояния до обвалования (80 м) и полуширины обвалования (31 м). Таким образом, расстояние от центра облака принималось равным  $R = 111$  м.

Корректировочный параметр  $\beta$  в соответствии с табл. 29 для бензина равен единице ( $\beta = 1$ ). Удельное энерговыделение  $E_{y\partial}$  (МДж/кг), определяемое в соответствии формулой (83), составляет:

$$E_{y\partial} = E_{y\partial 0} \cdot \beta = 44 \cdot \beta = 1 \cdot 44 = 44.$$

Величина энергозапаса  $E$  (Дж) определялась по формуле (80) с учетом удвоения энергозапаса в соответствии с п. 5.1 в связи с характером расположения облака. При этом консервативно принималось, что во взрыве участвует вся масса горючего вещества, содержащегося в облаке.

$$E = M_1 \cdot E_{y\partial} \cdot 10^6 \cdot 2 = 4838,4 \cdot 44 \cdot 10^6 \cdot 2 = 4,25 \cdot 10^{11}.$$

Атмосферное давление  $P_0 = 101300$  Па.

Безразмерное расстояние от центра облака  $R_x$ , определяемое по формуле (87), составляет:

$$R_x = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}} = \frac{111}{(4,25 \cdot 10^{11} / 101300)^{1/3}} = 0,687.$$

Степень расширения продуктов сгорания для паровоздушной смеси в соответствии с п. 5.5 принималась равной  $\sigma = 7$ .

Скорость звука принималась равной  $C_0 = 340$  м/с.

Величина безразмерного давления  $P_{x1}$  рассчитывается по формуле (94) и составляет:

$$\begin{aligned} P_{x1} &= \left( \frac{u^2}{C_0^2} \right) \cdot \left( \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \left( \frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right) = \\ &= \left( \frac{200^2}{340^2} \right) \cdot \left( \frac{7 - 1}{7} \right) \cdot \left( \frac{0,83}{0,687} - \frac{0,14}{0,687^2} \right) = 0,27. \end{aligned}$$

Параметр  $W$ , определяемый по формуле (96):

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

Величина безразмерного импульса фазы сжатия  $I_{x1}$  рассчитывается по формуле (95) и составляет:

$$\begin{aligned} I_{x1} &= W \cdot (1 - 0,4 \cdot W) \cdot \left( \frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3} \right) = 0,504 \cdot (1 - 0,4 \cdot 0,504) \cdot \\ &\cdot \left( \frac{0,06}{0,687} + \frac{0,01}{0,687^2} - \frac{0,0025}{0,687^3} \right) = 0,04. \end{aligned}$$

Величина избыточного давления  $\Delta P$  (Па) рассчитывается по формуле (92) и составляет:

$$\Delta P = P_{x1} \cdot P_0 = 0,27 \cdot 101300 = 27351.$$

Величина импульса фазы сжатия  $I^+$  (Па·с) рассчитывается по формуле (93) и составляет:

$$I^+ = I_{x1} \cdot P_0^{2/3} \cdot E^{1/3} / C_0 = 0,04 \cdot 101300^{2/3} \cdot (4,25 \cdot 10^{11})^{1/3} / 340 = 1948,74.$$

Аналогичным образом были получены зависимости избыточного давления и импульса фазы сжатия волны давления при сгорании паровоздушного облака для рассматриваемых сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров, связанных со взрывом паровоздушного облака, от расстояний до обвалования.

Графики зависимости избыточного давления в волне давления от расстояния до обвалования при взрыве паровоздушного облака, образовавшегося в результате испарения с поверхности пролива бензина в пределах обвалования (масса паров  $M_1 = 4838,4$  кг) и в результате полного разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование (масса паров  $M_2 = 109900,8$  кг), приведены на рис. Д8.

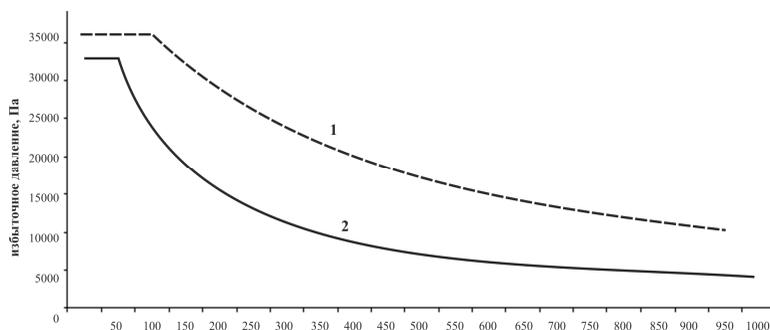


Рис. Д8. Зависимость избыточного давления в волне давления от расстояния до обвалования:  
 1 – масса паров  $M_2 = 109900,8$  кг,  
 2 – масса паров  $M_1 = 4838,4$  кг

Графики зависимости импульса фазы сжатия в волне давления от расстояния до обвалования при взрыве паровоздушного облака, образовавшегося в результате испарения с поверхности пролива бензина в пределах обвалования (масса паров  $M_1 = 4838,4$  кг) и в результате полного разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование (масса паров  $M_2 = 109900,8$  кг), приведены на рис. Д9.

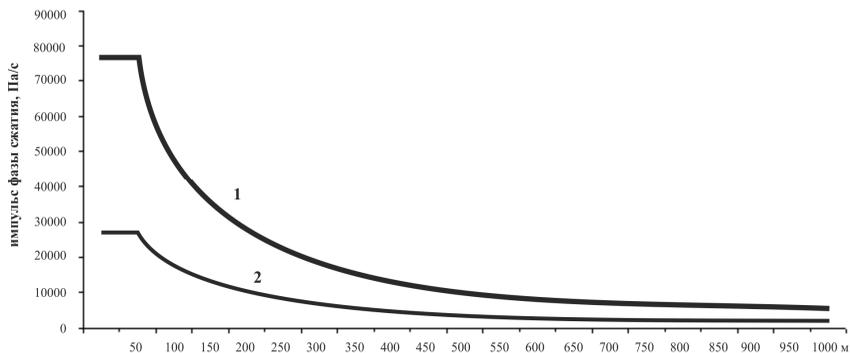


Рис. Д9. Зависимость импульса фазы сжатия в волне давления от расстояния до обвалования:

1 – масса паров  $M_2 = 109900,8$  кг; 2 – масса паров  $M_1 = 4838,4$  кг

### ***6. Оценка последствий воздействия опасных факторов пожара на людей для различных сценариев его развития***

В результате построения полей опасных факторов пожара для рассматриваемых сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров были определены следующие зависимости и величины.

1. Зависимость  $q_1(r)$  (рис. Д5) – зависимость интенсивности теплового излучения от расстояния до границы очага для пожаров: пожар пролива в обваловании без возникновения вторичных пожаров, пожар пролива в обваловании с возникновением вторичных пожаров резервуара, пожар резервуара по всей поверхности с возникновением вторичного пожара с площадью очага (площадью пролива)  $F_1 = 3500$  м<sup>2</sup>.

2. Зависимость  $q_2(r)$  (рис. Д6) – зависимость интенсивности теплового излучения от расстояния до границы очага для пожаров пролива бензина в обваловании и пролива перелившегося через обвалование бензина в результате полного разрушения резервуара как без возникновения вторичных пожаров, так и с возникновением вторичных пожаров, характеризующихся площадью очага (площадью пролива)  $F_2 = 79500 \text{ м}^2$ .

3. Зависимость  $q_3(r)$  (рис. Д7) – зависимость интенсивности теплового излучения от расстояния до границы очага для пожаров, связанных с возникновением пожара резервуара по всей поверхности без возникновения вторичных пожаров, характеризующихся площадью очага  $F_3 = 918 \text{ м}^2$ .

4. Горизонтальный размер взрывоопасной зоны, отсчитываемый от границы пролива,  $R1_{НКПР} = 80,34 \text{ м}$  – горизонтальный размер взрывоопасной зоны, образующейся в результате испарения с поверхности (площадь поверхности испарения  $F_{R1} = F_1 = 3500 \text{ м}^2$ ) пролива бензина в пределах обвалования.

5. Горизонтальный размер взрывоопасной зоны, отсчитываемый от границы пролива,  $R2_{НКПР} = 225,30 \text{ м}$  – горизонтальный размер взрывоопасной зоны, образующейся в результате испарения с поверхности пролива (площадь поверхности испарения  $F_{R2} = F_2 = 79500 \text{ м}^2$ ) в результате полного разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование.

6. Зависимости  $\Delta P_1(r)$  и  $I_1^+(r)$  (кривые 2 на рис. Д8 и Д9) – зависимости избыточного давления и импульса фазы сжатия волны давления при взрыве паровоздушного облака, образующегося в результате испарения с поверхности (площадь поверхности испарения  $F_{R1} = F_1 = 3500 \text{ м}^2$ ) пролива бензина в пределах обвалования, от расстояния до обвалования.

7. Зависимости  $\Delta P_2(r)$  и  $I_2^+(r)$  (кривые 1 на рис. Д8 и Д9) – зависимости избыточного давления и импульса фазы сжатия волны давления при взрыве паровоздушного облака, образующегося в результате испарения с поверхности пролива (площадь поверхности испарения  $F_{R2} = F_2 = 79500 \text{ м}^2$ ) в результате полного

разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование, от расстояния до обвалования.

На основе указанных выше зависимостей и величин определяются следующие условные вероятности поражения людей.

1.  $Q_{di}$  – условная вероятность поражения человека опасными факторами пожаров: пожар пролива в обваловании без возникновения вторичных пожаров, пожар пролива в обваловании с возникновением вторичных пожаров резервуара, пожар резервуара по всей поверхности с возникновением вторичного пожара, характеризующихся площадью очага (площадью пролива)  $F_1 = 3500 \text{ м}^2$ .

Таким образом,  $Q_{di}$  – условная вероятность поражения человека при реализации сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров (см. табл. Д1) № 1, 2, 5, 6, 13, 15, 16, 17, 20, 21, 24, 25, 28, 29, 32 и 33.

Суммарная частота реализации указанных сценариев ( $\text{год}^{-1}$ ) составляет:

$$Q_I = Q_1 + Q_2 + Q_5 + Q_6 + Q_{13} + Q_{15} + Q_{16} + Q_{17} + Q_{20} + Q_{21} + Q_{24} + Q_{25} + Q_{28} + Q_{29} + Q_{32} + Q_{33} = 2,3 \cdot 10^{-5} + 1,2 \cdot 10^{-6} + 3,3 \cdot 10^{-6} + 1,6 \cdot 10^{-7} + 8,6 \cdot 10^{-5} + 1,2 \cdot 10^{-6} + 9,5 \cdot 10^{-7} + 6,3 \cdot 10^{-7} + 4 \cdot 10^{-7} + 2,7 \cdot 10^{-7} + 1,6 \cdot 10^{-7} + 1,1 \cdot 10^{-7} + 6,8 \cdot 10^{-8} + 4,5 \cdot 10^{-8} + 2,1 \cdot 10^{-8} + 1,1 \cdot 10^{-9} = 1,2 \cdot 10^{-4}.$$

2.  $Q_{dII}$  – условная вероятность поражения человека опасными факторами пожаров пролива бензина в обваловании и пролива перелившегося через обвалование бензина в результате полного разрушения резервуара как без возникновения вторичных пожаров, так и с возникновением вторичных пожаров, характеризующихся площадью очага (площадью пролива)  $F_2 = 79500 \text{ м}^2$ .

Таким образом,  $Q_{dII}$  – условная вероятность поражения человека при реализации сценария развития пожароопасных ситуаций и пожаров (см. табл. Д1) № 9.

Суммарная частота реализации указанного сценария ( $\text{год}^{-1}$ ) составляет:

$$Q_{II} = Q_9 = 1,8 \cdot 10^{-6}.$$

3.  $Q_{dIII}$  – условная вероятность поражения человека опасными факторами пожаров, связанных с возникновением пожара резервуара по всей поверхности (площадь очага  $F_3 = 918$  м) без возникновения вторичных пожаров.

Таким образом,  $Q_{dIII}$  – условная вероятность поражения человека при реализации сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров (см. табл. Д1) № 12, 14.

Суммарная частота реализации указанных сценариев ( $\text{год}^{-1}$ ) составляет:

$$Q_{III} = Q_{12} + Q_{14} = 8,6 \cdot 10^{-5} + 2,3 \cdot 10^{-5} = 1,1 \cdot 10^{-4}.$$

4.  $Q_{dIV}$  – условная вероятность поражения человека опасными факторами пожаров, связанных со сгоранием в режиме пожара-вспышки паровоздушного облака, образующегося в результате испарения с поверхности (площадь поверхности испарения  $F_{R1} = F_1 = 3500$  м<sup>2</sup>) пролива бензина в пределах обвалования.

Таким образом,  $Q_{dIV}$  – условная вероятность поражения человека при реализации сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров (см. табл. Д1) № 4, 8, 19, 23, 27, 31 и 35.

Суммарная частота реализации указанных сценариев ( $\text{год}^{-1}$ ) составляет:

$$\begin{aligned} Q_{IV} &= Q_4 + Q_8 + Q_{19} + Q_{23} + Q_{27} + Q_{31} + Q_{35} = \\ &= 6,3 \cdot 10^{-7} + 8,6 \cdot 10^{-8} + 5,0 \cdot 10^{-7} + 2,0 \cdot 10^{-7} + 8,3 \cdot 10^{-8} + 2,1 \cdot 10^{-8} + 1,1 \cdot 10^{-8} = \\ &= 1,52 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

5.  $Q_{dV}$  – условная вероятность поражения человека опасными факторами пожаров, связанных со сгоранием в режиме пожара-вспышки паровоздушного облака, образующегося в результате испарения с поверхности пролива (площадь поверхности испарения  $F_{R2} = F_2 = 79500$  м<sup>2</sup>) в результате полного разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование.

Таким образом,  $Q_{dV}$  – условная вероятность поражения человека при реализации сценария развития пожароопасных ситуаций и пожаров (см. табл. Д1) № 11.

Суммарная частота реализации указанного сценария (год<sup>-1</sup>) составляет:

$$Q_V = Q_{11} = 4,6 \cdot 10^{-8}.$$

6.  $Q_{dVI}$  – условная вероятность поражения человека опасными факторами пожаров, связанных со взрывом паровоздушного облака, образующегося в результате испарения с поверхности (площадь поверхности испарения  $F_{R1} = F_1 = 3500 \text{ м}^2$ ) пролива бензина в пределах обвалования.

Таким образом,  $Q_{dVI}$  – условная вероятность поражения человека при реализации сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров (см. табл. Д1) № 3, 7, 18, 22, 26, 30 и 34.

Суммарная частота реализации указанных сценариев (год<sup>-1</sup>) составляет:

$$\begin{aligned} Q_{VI} &= Q_3 + Q_7 + Q_{18} + Q_{22} + Q_{26} + Q_{30} + Q_{34} = \\ &= 9,5 \cdot 10^{-7} + 1,3 \cdot 10^{-7} + 1,0 \cdot 10^{-5} + 3,9 \cdot 10^{-6} + 1,6 \cdot 10^{-6} + 3,9 \cdot 10^{-7} + 1,7 \cdot 10^{-8} = \\ &= 1,7 \cdot 10^{-5}. \end{aligned}$$

7.  $Q_{dVII}$  – условная вероятность поражения человека опасными факторами пожаров, связанных со взрывом паровоздушного облака, образующегося в результате испарения с поверхности пролива (площадь поверхности испарения  $F_{R2} = F_2 = 79500 \text{ м}^2$ ) в результате полного разрушения резервуара с переливом части бензина через обвалование.

Таким образом,  $Q_{dVII}$  – условная вероятность поражения человека при реализации сценариев развития пожароопасной ситуации и пожаров (см. табл. Д1) № 10.

Суммарная частота реализации указанного сценария (год<sup>-1</sup>) составляет:

$$Q_{VII} = Q_{10} = 6,9 \cdot 10^{-8}.$$

Для оценки поражающего воздействия опасных факторов пожара, характерных для рассматриваемых сценариев развития пожароопасных ситуаций и пожаров, использовались вероятностные и детерминированные критерии.

Определим условные вероятности поражения человека для сценариев, связанных с возникновением пожаров проливов и пожаров резервуаров по всей поверхности (условные вероятности поражения  $Q_{db}$ ,  $Q_{dib}$ ,  $Q_{dii}$ ).

Указанные условные вероятности в зоне непосредственного воздействия пламени пожаров (в пределах очага пожара), соответствующих этим условным вероятностям поражения, принимались равными 1.

Таким образом, для сценариев пожаров: пожар пролива в обваловании без возникновения вторичного пожара, пожар пролива в обваловании с возникновением вторичного пожара резервуара, условная вероятность поражения человека ( $Q_{di}$ ) в зоне, ограниченной обвалованием, принималась равной 1.

Для пожаров пролива бензина в обваловании и пролива перелившегося через обвалование бензина в результате полного разрушения резервуара как без возникновения вторичного пожара, так и с возникновением вторичного пожара условная вероятность поражения человека ( $Q_{dii}$ ) в пределах обвалования и в полосе вдоль обвалования шириной  $X = 109,5$  м принималась равной 1.

Для пожаров, связанных с возникновением пожара резервуара по всей поверхности без возникновения вторичного пожара, условная вероятность поражения человека ( $Q_{diii}$ ) в пределах площади, занимаемой резервуаром, принималась равной 1.

Условные вероятности поражения человека  $Q_{db}$ ,  $Q_{dib}$ ,  $Q_{dii}$  за пределами соответствующих им очагов пожаров определялись с использованием пробит-функции (формула (15)) на основе полученных зависимостей  $q_1(r)$ ,  $q_2(r)$ ,  $q_3(r)$ .

В качестве примера для демонстрации расчета условной вероятности поражения тепловым излучением пожара с использованием пробит-функции ниже приведен расчет условной вероятности поражения человека тепловым излучением пожара про-

лива бензина площадью  $F_3 = 918,6 \text{ м}^2$  (пожар резервуара по всей поверхности) в точке, расположенной на расстоянии  $r = 20 \text{ м}$  от границы очага пожара.

Интенсивность теплового излучения указанного выше пожара в рассматриваемой точке составляет  $q = 14,3 \text{ кВт/м}$ .

Расстояние от рассматриваемой точки до зоны, где интенсивность теплового излучения рассматриваемого пожара равна  $4 \text{ кВт/м}$ , составляет  $X = 53,25 \text{ м}$ .

Величина эффективного времени экспозиции  $t$  (с), определяемого по формуле (17), составляет:

$$t = t_0 + \frac{x}{u} = 5 + \frac{53,25}{5} = 15,65.$$

Значение пробит-функции  $P_r$ , определяемое по формуле (15), составляет:

$$P_r = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(t \cdot q^{4/3}) = -12,8 + 2,56 \cdot \ln(15,65 \cdot 14,3^{4/3}) = 3,32.$$

В соответствии с табл. 22 значение условной вероятности  $Q_{dIII}$  поражения в зависимости от значения пробит-функции составляет  $0,05$ . Значения пробит-функции, меньше или равные нулю, соответствуют условной вероятности поражения, равной нулю. Аналогичным образом были получены значения условных вероятностей поражения  $Q_{dI}$ ,  $Q_{dII}$  на расстояниях  $20 \text{ м}$  от границ соответствующих очагов пожара, которые соответственно составляют  $0$  и  $0,63$ .

Принималось, что условная вероятность поражения человека, попавшего в зону воздействия высокотемпературных продуктов сгорания паровоздушного облака  $Q_{dIV}$ ,  $Q_{dV}$ , равна  $1$ , за пределами этой зоны условная вероятность поражения человека принималась равной  $0$ . Условные вероятности поражения человека при взрыве паровоздушного облака  $Q_{dVI}$ ,  $Q_{dVII}$  внутри обвалования принимались равными  $1$ .

**7. Вычисление расчетных величин пожарного риска**  
*Потенциальный пожарный риск на территории объекта  
и в селитебной зоне вблизи объекта*

При определении потенциального пожарного риска для рассматриваемого резервуара его территория для удобства расчетов была разделена на зоны: А и В (см. рис. Д10), внутри которых значения потенциального риска  $P$  полагаются одинаковыми.

Условные вероятности поражений в зоне А составляют:

$$Q_{dI} = 1; Q_{dII} = 1; Q_{dIII} = 1; Q_{dIV} = 1; Q_{dV} = 1; Q_{dVI} = 1; Q_{dVII} = 1.$$

Условные вероятности поражений в зоне В составляют:

$$Q_{dI} = 1; Q_{dII} = 1; Q_{dIII} = 0,23 \text{ (на расстоянии } X = 17 \text{ м)}; Q_{dIV} = 1; Q_{dV} = 1; Q_{dVI} = 1; Q_{dVII} = 1.$$

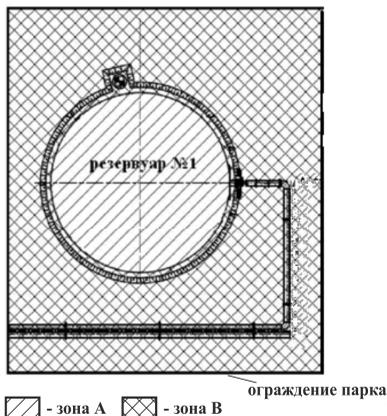


Рис. Д10. Схема резервуарного парка к расчету потенциального пожарного риска в границах обвалования

Таким образом, величина потенциального пожарного риска в зоне А  $P_A$  (год<sup>-1</sup>) составляет:

$$\begin{aligned}
 P_A &= \sum_{j=1}^J (Q_{dj} \cdot Q_j) = \\
 &= (Q_{dI} \cdot Q_I + Q_{dII} \cdot Q_{II} + Q_{dIII} \cdot Q_{III} + Q_{dIV} \cdot Q_{IV} + Q_{dV} \cdot Q_V + Q_{dVI} \cdot Q_{VI} + Q_{dVII} \cdot Q_{VII}) = \\
 &= 1,2 \cdot 10^{-4} + 1,8 \cdot 10^{-6} + 1,1 \cdot 10^{-4} + 1,52 \cdot 10^{-6} + 1,46 \cdot 10^{-8} + 1,7 \cdot 10^{-5} + \\
 &+ 1,69 \cdot 10^{-8} = 2,5 \cdot 10^{-4}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, величина потенциального пожарного риска в зоне В  $P_B$  (год<sup>-1</sup>) составляет:

$$\begin{aligned}
 P_B &= \sum_{j=1}^J (Q_{dj} \cdot Q_j) = \\
 &= (Q_{dI} \cdot Q_I + Q_{dII} \cdot Q_{II} + Q_{dIII} \cdot Q_{III} + Q_{dIV} \cdot Q_{IV} + Q_{dV} \cdot Q_V + Q_{dVI} \cdot Q_{VI} + Q_{dVII} \cdot Q_{VII}) = \\
 &1,2 \cdot 10^{-4} + 1,8 \cdot 10^{-6} + 0,23 \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} + 1,52 \cdot 10^{-6} + 1,46 \cdot 10^{-8} + 1,7 \cdot 10^{-5} \\
 &+ 1,69 \cdot 10^{-8} = 1,7 \cdot 10^{-4}.
 \end{aligned}$$

**Задача 3.** Определить величину потенциального, индивидуального и социального пожарного риска для здания производственного назначения.

#### **Исходные данные**

Здание производственного назначения является цехом деревообработки, с размерами в плане, представленными на рис. Д11. Очаг пожара развивается по площади и высоте. Над очагом пожара формируется конвективная колонка, которая, поднимаясь над очагом пожара, достигает потолка и растекается по нему веерной струей. При этом формируется задымленная зона, которая распространяется по всему объему коридора. Система оповещения людей при пожаре и средства спасения в здании отсутствуют. В помещении № 1 находятся два человека, в помещении № 2 – три человека, в помещении № 3 – пять человек. Люди работают в две смены. Высота помещений составляет 4 метра. Ширина дверных проемов 1 м. Начальная температура воздуха 25 °С. Горению подвержены твердые горючие материалы с очагом пожара в центре коридора № 4. Частота возникновения пожара в цехе деревообработки соот-

ветствует частоте возникновения пожара на складе с многономенклатурной продукцией (табл. 3).

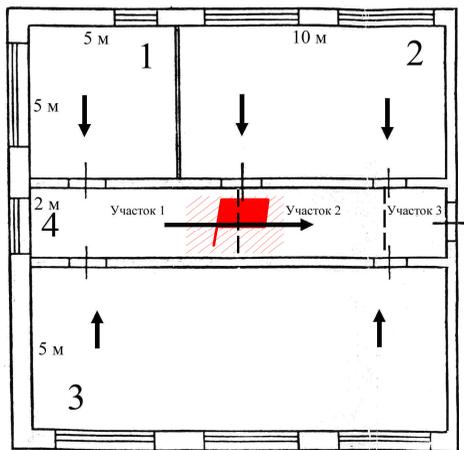


Рис. Д11. Одноэтажное здание производственного объекта

### Порядок решения

#### 1. Определим расчетное время эвакуации

Расчетное время эвакуации людей из помещений и зданий определяется в соответствии с п. 7.2 данного пособия.

Рассчитываем плотности однородных людских потоков на первоначальных участках пути  $D$  по формуле (149):

$$D_1 = \frac{N_1 \cdot f}{l_1 \cdot \delta_1} = \frac{2 \cdot 0,125}{5 \cdot 5} = 0,01.$$

Помещение № 2 делим на две одинаковые части: на левую часть с эвакуирующимся одним человеком и правую часть с эвакуирующимися двумя людьми.

$$D_{21} = \frac{N_{21} \cdot f}{l_{21} \cdot \delta_{21}} = \frac{1 \cdot 0,125}{5 \cdot 5} = 0,005;$$

$$D_{22} = \frac{N_{22} \cdot f}{l_{22} \cdot \delta_{22}} = \frac{2 \cdot 0,125}{5 \cdot 5} = 0,01;$$

Аналогично помещение № 3 делим на две одинаковые части: на левую часть с эвакуирующимися двумя человеками и правую часть с эвакуирующимися тремя человеками.

$$D_{31} = \frac{N_{31} \cdot f}{l_{31} \cdot \delta_{31}} = \frac{2 \cdot 0,125}{5 \cdot 7,5} = 0,007;$$

$$D_{32} = \frac{N_{32} \cdot f}{l_{32} \cdot \delta_{32}} = \frac{3 \cdot 0,125}{5 \cdot 7,5} = 0,01;$$

Определяем по табл. 32 скорость движения людских потоков по горизонтальному пути на первоначальных участках  $v$  (м/мин), а также интенсивность их движения  $q$  (м/мин) в зависимости от плотности людских потоков  $D$ :

$$v_1 = v_{21} = v_{22} = v_{31} = v_{32} = 100;$$

$$q_1 = q_{21} = q_{22} = q_{31} = q_{32} = 1.$$

Время движения людского потока на первоначальных участках пути  $t_i$  (мин) рассчитываем по формуле (148):

$$t_1 = t_{21} = t_{22} = t_{31} = t_{32} = \frac{l_1}{v_1} = \frac{5}{100} = 0,05.$$

По формуле (150) определяем интенсивность движения людских потоков  $q$  (м/мин) на последующих участках пути и в дверных проемах:

$$q_{10} = \frac{q_1 \cdot \delta_1}{\delta_{10}} = \frac{1 \cdot 5}{1} = 5;$$

$$q_{21\partial} = q_{22\partial} = \frac{q_{21\partial} \cdot \delta_{21}}{\delta_{21\partial}} = \frac{1 \cdot 5}{1} = 5;$$

$$q_{31\partial} = q_{32\partial} = \frac{q_{31\partial} \cdot \delta_{31}}{\delta_{31\partial}} = \frac{1 \cdot 7,5}{1} = 7,5.$$

Как видим, выполняется условие (152), из чего следует, что задержки в дверных проемах и на первоначальных участках пути не происходят.

Разделяем коридор № 4 на три участка, до мест слияния. Определяем интенсивность  $q$  (м/мин) по формуле (156). По табл. 32 с помощью метода линейной интерполяции определяем соответствующие значения скорости движения людских потоков по горизонтальному пути  $v$  (м/мин) в зависимости от найденных значений интенсивности  $q$  (м/мин). Затем определяем время движения людского потока  $t$  (мин) по формуле (148).

– для участка № 1 коридора № 4:

$$q_{41} = \frac{q_{1\partial} \cdot \delta_{1\partial} + q_{31\partial} \cdot \delta_{31\partial}}{\delta_{41}} = \frac{5 \cdot 1 + 7,5 \cdot 1}{2} = 6,25;$$

$$v_{41} = 100 + \frac{(80 - 100) \cdot (6,25 - 5)}{8 - 5} = 91,7;$$

$$t_{41} = \frac{7,5}{91,7} = 0,082.$$

– для участка № 2 коридора № 4:

$$q_{42} = \frac{q_{41} \cdot \delta_{41} + q_{21\partial} \cdot \delta_{21\partial}}{\delta_{42}} = \frac{6,25 \cdot 2 + 5 \cdot 1}{2} = 8,75;$$

$$v_{42} = 80 + \frac{(60 - 80) \cdot (8,75 - 8)}{12 - 8} = 76,3;$$

$$t_{42} = \frac{5}{76,3} = 0,066.$$

– для участка № 3 коридора № 4:

$$q_{43} = \frac{q_{42} \cdot \delta_{42} + q_{22\partial} \cdot \delta_{22\partial} + q_{32\partial} \cdot \delta_{32\partial}}{\delta_{43}} = \frac{8,75 \cdot 2 + 5 \cdot 1 + 7,5 \cdot 1}{2} = 15;$$

$$v_{43} = 47 + \frac{(40 - 47) \cdot (15 - 14,1)}{16 - 14,1} = 43,7;$$

$$t_{43} = \frac{2,5}{43,7} = 0,057.$$

Определяем интенсивность  $q$  (м/мин) в последующем, после коридора № 4, дверном проеме, по формуле (150):

$$q_{4\partial} = \frac{q_{43} \cdot \delta_{43}}{\delta_{4\partial}} = \frac{15 \cdot 2}{1} = 30.$$

В связи с тем, что здесь не выполняется условие (152), в данном дверном проеме наблюдается задержка людей.

Определяем по формуле (154) количество людей  $N'$ , которое успеет выйти с участка № 3 коридора № 4 до момента образования скопления в момент  $t_{43} = 0,057$  мин:

$$N' = \frac{q_{42} \cdot \delta_{42} \cdot t_{43}}{f} = \frac{8,75 \cdot 2 \cdot 0,057}{0,125} = 7,98 \text{ чел} \approx 8 \text{ чел} = 1 \text{ м}^2.$$

Определяем возможное (общее) количество людей, формирующее в этот момент скопление в дверном проеме, ведущим из коридора № 4:

$$N_{\text{ск}} = f \cdot N_{\text{эм}} - N' = 0,125 \cdot 10 - 1 = 0,25 \text{ м}^2 = 2 \text{ чел}.$$

По формуле (153) определяем время задержки  $t_{\text{зад}}$  (мин) людей в дверном проеме, ведущим из коридора № 4:

$$N_{\text{зао4о}} = N_{\text{ск}} \cdot f \cdot \left( \frac{1}{q_{4\text{оприD}=0,9} \cdot \delta_{4\text{о}}} - \frac{1}{q_{43} \cdot \delta_{43}} \right) = 2 \cdot 0,125 \cdot \left( \frac{1}{6,25 \cdot 1} - \frac{1}{15 \cdot 2} \right) = 0,032,$$

где интенсивность  $q$ , м/мин, при плотности движения людского потока 0,9 и более, при ширине дверного проема менее 1,6 м определено по выражению:

$$q_{4\text{о}} = 2,5 + 3,75 \cdot \delta_{4\text{д}} = 2,5 + 3,75 \cdot 1 = 6,25 \text{ м/мин.}$$

По формуле (147) определяем общее время эвакуации  $t_p$  с учетом того, что существует два маршрута из равнозначно удаленных от выхода первоначальных участка:

$$\begin{aligned} t_p &= t_{p1} = t_{p2} = (t_1 = t_{31}) + t_{41} + t_{42} + t_{43} + t_{\text{зао4о}} = \\ &= 0,05 + 0,082 + 0,066 + 0,057 + 0,032 = 0,29 \text{ мин} = 17,4 \text{ с.} \end{aligned}$$

2. *Определим время наступления опасных факторов пожара ( $\tau_{\text{бл}}$ ) в коридоре № 4 цеха деревообработки*

Предварительно рассчитаем по формулам (145), (135) и (141) размерный параметр, учитывающий удельную массовую скорость выгорания горючего материала ( $A$ ), размерный комплекс, зависящий от теплоты сгорания материала и свободного объема помещения ( $B$ ), безразмерный параметр, учитывающий неравномерность распределения опасных факторов пожара по высоте помещения ( $Z$ ):

$$A = 1,05 \cdot \Psi_f \cdot V_{\text{ли}}^2 = 1,05 \cdot 0,0145 \cdot 0,022^2 = 7,4 \cdot 10^{-6};$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{353 \cdot C_p \cdot V_{\text{св}}}{(1-g) \cdot w \cdot Q} = \\ &= (353 \cdot 0,001068 \cdot 0,8 \cdot 15 \cdot 2 \cdot 4) / ((1-0,25) \cdot 0,51 \cdot 13,8) = 6,5; \end{aligned}$$

$$Z = \frac{h}{H} \exp\left(1,4 \frac{h}{H}\right) = (1,7/4) \cdot \exp(1,4 \cdot (1,7/4)) = 0,771.$$

По формулам (131)–(134) рассчитываем критическую про-

должительность пожара по каждому опасному фактору пожара:  
 – по повышенной температуре:

$$t_{\text{кр}}^t = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{70 - t_0}{(273 + t_0) \cdot Z} \right] \right\}^{1/n} = \left\{ \frac{6,5}{7,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{70 - 25}{(273 + 25) \cdot 0,771} \right] \right\}^{1/3} = 53,9 \text{ с;}$$

– по потере видимости:

$$t_{\text{кр}}^{\text{п.в.}} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{V_{\text{св}} \cdot \ln(1,05 \cdot a \cdot E)}{l_{\text{пр}} \cdot B \cdot D_m \cdot Z} \right]^{-1} \right\}^{1/n} =$$

$$= \left\{ \frac{6,5}{7,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{0,8 \cdot 15 \cdot 2 \cdot 4 \cdot \ln(1,05 \cdot 0,5 \cdot 50)}{20 \cdot 6,5 \cdot 57 \cdot 0,771} \right]^{-1} \right\}^{1/3} = 36,7 \text{ с;}$$

– по пониженному содержанию кислорода:

$$t_{\text{кр}}^{\text{O}_2} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{0,044}{\left( \frac{B \cdot L_{\text{O}_2}}{V_{\text{св}}} + 0,27 \right)} \right]^{-1} \right\}^{1/n} = \left\{ \frac{6,5}{7,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{0,044}{\left( \frac{6,5 \cdot 1,15}{0,8 \cdot 15 \cdot 2 \cdot 4} + 0,27 \right)} \right]^{-1} \right\}^{1/3} = 49,2 \text{ с}$$

– по каждому из газообразных токсичных продуктов горения:

$$t_{\text{кр}}^{\text{CO}} = \left\{ \frac{B}{A} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{V_{\text{св}} \cdot X}{B \cdot L_T \cdot Z} \right]^{-1} \right\}^{1/n} =$$

$$= \frac{\left\{ \frac{6,5}{7,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{0,8 \cdot 15 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1,16 \cdot 10^{-3}}{6,5 \cdot 0,024 \cdot 0,771} \right]^{-1} \right\}^{1/3}}{\left\{ \frac{6,5}{7,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{0,8 \cdot 15 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 0,11}{6,5 \cdot 1,57 \cdot 0,771} \right]^{-1} \right\}^{1/3}} = 131,7 \text{ с, по содержанию CO}$$

$$\left\{ \frac{6,5}{7,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{0,8 \cdot 15 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 23 \cdot 10^{-6}}{6,5 \cdot 0 \cdot 0,771} \right]^{-1} \right\}^{1/3} = \text{не опасно, по содержанию CO}_2$$

$$\left\{ \frac{6,5}{7,4 \cdot 10^{-6}} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{0,8 \cdot 15 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 23 \cdot 10^{-6}}{6,5 \cdot 0 \cdot 0,771} \right]^{-1} \right\}^{1/3} = \text{не опасно, по содержанию HCl}$$

По функции (130) определяем время блокирования путей эвакуации  $\tau_{\text{бл}}$  (мин):

$$\tau_{\text{бл}} = \min \{t_{\text{КР}}^T, t_{\text{КР}}^{\text{П.В}}, t_{\text{КР}}^{02}, t_{\text{КР}}^{\text{Т.Г}}\} = \min \{53,9; 36,7; 49,2; 131,7\} = 6,7 \text{ с} = 0,61 \text{ мин.}$$

3. Определим величины потенциального риска  $P_i$  ( $\text{год}^{-1}$ ) в  $i$ -м помещении здания

По условию (26) определяем вероятность эвакуации по эвакуационным путям  $P_{\text{эп}}$ :

$$\begin{aligned} 0,29 < 0,8 \cdot 0,5 < 0,29 + 0,5 & - \text{условие выполняется;} \\ 0,29 + 0,5 \leq 0,8 \cdot 0,5 & - \text{условие не выполняется;} \\ 0,29 \geq 0,8 \cdot 0,5 & - \text{условие не выполняется.} \end{aligned}$$

Из условия выполнения:

$$P_{\text{эп}} = \frac{0,8 \cdot \tau_{\text{бл}} - t_P}{\tau_{\text{н.э}}} = \frac{0,8 \cdot 0,61 - 0,29}{0,5} = 0,399,$$

где  $\tau_{\text{н.э}} = 0,5$  мин, т. к. пожар произошел на рассматриваемом этаже при отсутствии системы оповещения.

Определяем по формуле (25) вероятность эвакуации  $P_{\text{э}}$  при условии отсутствия средств спасения:

$$P_{\text{э}} = 1 - (1 - P_{\text{эп}}) \cdot (1 - P_{\text{д.в}}) = 1 - (1 - 0,396) \cdot (1 - 0,001) = 0,397.$$

По формуле (24) определяем условную вероятность поражения человека  $Q_d$ , с учетом того, что отсутствуют данные по эффективности технических средств:

$$Q_d = (1 - P_{\text{э}}) \cdot (1 - D) = (1 - 0,397) \cdot (1 - 0) = 0,603.$$

По формуле (23) определяем величину потенциального риска  $P_i$  ( $\text{год}^{-1}$ ) в 4-м помещении (коридор) здания, с учетом того, что частота возникновения пожара соответствует складу

многономенклатурной продукции:

$$P = 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,603 = 1,629 \cdot 10^{-3},$$

где частота реализации в течение года сценария пожара  $Q$  для цеха деревообработки с площадью  $30 \text{ м}^2$  определена условием:  
 $Q = 9 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{год}^{-1} \cdot 30 \text{ м}^2 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$ .

4. По формуле (30) определяем индивидуальный пожарный риск выхода людей непосредственно наружу из коридора № 4 при условии, что люди работают в две смены:

$$R_m = 1,629 \cdot 10^{-3} \cdot 0,66 = 1,075 \cdot 10^{-4}.$$

5. Определяем социальный пожарный риск по формуле (31).

Предварительно по формуле (32) определяем среднее число погибших:

$$N_i = Q_d \cdot n_i = 0,603 \cdot 10 = 6,03 \approx 7 \text{ чел.}$$

В связи с тем, что по указанному сценарию гибнет менее 10 человек, социальный риск равен нулю ( $S = 0$ ).

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

**Иванов Юрий Иосифович**  
**Зубарева Вера Андреевна**  
**Беспёрстов Дмитрий Александрович**  
**Пашкевич Наталья Александровна**

**ОЦЕНКА ПОЖАРНОГО РИСКА  
НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

Учебное пособие

Для студентов вузов

Редактор *Ю.Н. Тулунов*  
Технический редактор *М.С. Сорокина*  
Художественный редактор *Е.П. Лопатин*

ЛР № 020524 от 02.06.97  
Подписано в печать 17.05.2013. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times.  
Уч.-изд. л. 14,3. Тираж 200 экз.  
Заказ № 15

Оригинал-макет изготовлен в лаборатории множительной техники  
Кемеровского технологического института пищевой промышленности  
650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 7

ПЛД № 44-09 от 10.10.99  
Отпечатано в лаборатории множительной техники  
Кемеровского технологического института пищевой промышленности  
650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 7