

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра инженерной психологии и эргономики

Н. В. Щербина, В. С. Осипович, К. Д. Яшин

ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ. ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия
для специальности 6-05-0611-01 «Информационные системы и технологии»*

2-е издание, дополненное и пересмотренное

Минск БГУИР 2026

УДК 331.45(076)
ББК 65.247я73
Щ61

Рецензенты:

кафедра управления охраной труда
учреждения образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет»
(протокол № 3 от 06.10.2025);

заместитель директора по учебной и научной работе ГУО «Республиканский
центр государственной экологической экспертизы, подготовки, повышения
квалификации и переподготовки кадров» Министерства природных ресурсов
и охраны окружающей среды Республики Беларусь
кандидат технических наук, доцент Д. А. Мельниченко

Щербина, Н. В.

Щ61

Основы промышленной безопасности. Практикум : учеб.-метод.
пособие / Н. В. Щербина, В. С. Осипович, К. Д. Яшин. – 2-е изд., доп. и
пересм. – Минск : БГУИР, 2026. – 164 с. : ил.
ISBN 978-985-543-883-1.

Излагается теоретический материал и приводятся примеры решения задач с использованием изложенных методик, задачи для самостоятельного решения по оценке обстановки при авариях на химически опасных объектах, по определению категории производственного помещения по взрывопожарной и пожарной опасности, по определению размера зон при аварийном поступлении ГГ и ЛВЖ в открытое пространство, по проектированию общего равномерного искусственного освещения, по моделированию происшествий для анализа развития аварийной ситуации, по оценке загрязняющих веществ, поступающих в атмосферу от стационарных источников, по оценке надежности технических систем.

Первое издание выпущено в 2016 г.

**УДК 331.45(076)
ББК 65.247я73**

ISBN 978-985-543-883-1

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
Тема 1. Оценка обстановки при авариях на химически опасных объектах	6
Теоретические сведения	6
Пример решения задачи.....	23
Задача для самостоятельной работы	42
Содержание отчета.....	42
Контрольные вопросы	42
Список использованных источников	45
Тема 2. Взрывопожаробезопасность на производстве.....	46
Теоретические сведения	46
Пример решения задач.....	58
Задачи для самостоятельной работы.....	62
Содержание отчета.....	65
Контрольные вопросы	65
Список использованных источников	69
Тема 3. Проектирование и расчет производственного освещения.....	70
Теоретические сведения	70
Пример решения задачи.....	81
Задача для самостоятельной работы	84
Содержание отчета.....	88
Контрольные вопросы	88
Список использованных источников	88
Тема 4. Моделирование и системный анализ происшествий с помощью диаграмм типа «дерево».....	89
Теоретические сведения	89
Пример решения задач.....	105
Задачи для самостоятельной работы.....	109
Содержание отчета.....	109
Контрольные вопросы	109
Список использованных источников	110

Тема 5. Расчет предельно-допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников	111
Теоретические сведения	111
Пример решения задач	136
Задачи для самостоятельной работы	142
Содержание отчета	143
Контрольные вопросы.....	150
Список использованных источников	150
Тема 6. Оценка надежности технических систем.....	151
Теоретические сведения	151
Пример решения задачи.....	156
Задача для самостоятельной работы	159
Содержание отчета	163
Контрольные вопросы.....	163
Список использованных источников	163

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная безопасность опасных производственных объектов – это состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от аварий на опасных производственных объектах и последствий указанных аварий.

Предметом промышленной безопасности является исследование надежности и безопасности технических систем, анализ и управление риском в природной и техногенной сферах.

Целью промышленной безопасности является предотвращение и/или минимизация последствий аварий на опасных производственных объектах.

Поэтому задачей промышленной безопасности является сведение к минимуму возникновения аварий на опасных производственных объектах путем осуществления разноплановых мероприятий.

Данное учебно-методическое пособие разработано в соответствии с программой курса «Основы промышленной безопасности» и призвано помочь студентам более глубоко изучить практические вопросы, связанные с анализом и оценкой состояния промышленной безопасности на производстве, прогнозированием чрезвычайных ситуаций и оценкой ущерба, нанесенного в результате аварий.

Тема 1. Оценка обстановки при авариях на химически опасных объектах

Цель: формирование у студентов знаний и навыков в области прогнозирования и оценки химической обстановки в результате химических аварий на опасных производственных объектах; определение возможных потерь населения в очаге химического поражения.

План занятия:

- 1 Изучить теорию.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.
- 4 Оформить отчет.

Теоретические сведения

В соответствии с СН 2.02.04-2020 [1] организации, имеющие в обращении аварийно химически опасные вещества (АХОВ) (сильнодействующие ядовитые вещества), создают локальные системы контроля технологического процесса и мониторинга окружающей среды, обеспечивающие немедленную передачу информации об авариях и инцидентах в центр оперативного управления территориальных отделов (органов) МЧС, а также локальные системы оповещения об аварии персонала и населения с доведением необходимой речевой информации.

Зона действия указанных локальных систем оповещения должна устанавливаться по результатам определения границ зоны возможного опасного химического заражения. Расчет зоны химического заражения АХОВ (АХОВ) выполняется согласно РД 52.04.253–90 [2] и СП 2.02.03-2024 [4].

Методика РД 52.04.253–90 распространяется на случай выброса АХОВ в атмосферу в газообразном, парообразном или аэрозольном состоянии. *Расчет зоны химического заражения в зависимости от их физических свойств и агрегатного состояния определяется для первичного и вторичного облаков:*

- для сжиженных газов – отдельно для первичного и вторичного;
- для сжатых газов – только для первичного;
- для ядовитых жидкостей с температурой кипения выше температуры окружающей среды – только для вторичного.

Химически опасный объект (ХОО) – объект, предназначенный для хранения, переработки, использования или транспортировки опасных

химических веществ, при аварии на котором или при его разрушении может произойти гибель или химическое поражение людей, сельскохозяйственных животных и растений, а также химическое заражение окружающей среды.

Авария – разрушение опасных производственных объектов и (или) потенциально опасных объектов, в том числе эксплуатируемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ.

Разрушение химически опасного объекта – результат катастроф или стихийных бедствий, приведший к полной разгерметизации всех емкостей на объекте и нарушению технологических коммуникаций.

Химическая авария – авария на химически опасном объекте, сопровождающаяся проливом или выбросом опасных химических веществ, способная привести к гибели или химическому заражению людей, продовольствия, пищевого сырья и кормов, сельскохозяйственных животных и растений, или к химическому заражению окружающей природной среды.

Опасное химическое вещество (ОХВ) – химическое вещество, прямое или опосредованное воздействие которого на человека может вызвать острые и хронические заболевания людей или их гибель.

Аварийно химическое опасное вещество (АХОВ) – ОХВ, применяемое в промышленности и сельском хозяйстве, при аварийном выбросе (разливе) которого может произойти заражение окружающей среды в поражающих живой организм концентрациях (токсодозах).

Химическое заражение – распространение ОХВ в окружающей природной среде в концентрациях или количествах, создающих угрозу для людей, сельскохозяйственных животных и растений в течение определенного времени.

Свойство веществ вызывать отравления (интоксикацию) организма называют *токсичностью*.

Для *количественной оценки токсичности* приняты следующие основные параметры:

- концентрация ОХВ в среде – содержание ОХВ в единице объема или массы среды (мг/м^3 , мг/кг);

- токсодоза – произведение концентрации ОХВ на время пребывания человека в данном месте без средств защиты органов дыхания, в течение которого проявляются различные степени токсического воздействия ОХВ на организм человека.

Химическая безопасность – состояние защищенности населения, объектов экономики и окружающей природной среды от поражающих факторов аварии на ХОО, сопровождающейся проливом или выбросом АХОВ.

Зона фактического химического заражения – территория, зараженная аварийно химически опасным веществом в опасных для жизни людей пределах.

Первичное облако – облако аварийно химически опасного вещества, образующееся в результате мгновенного (1–3 мин) перехода в атмосферу части аварийно химически опасного вещества из емкости при ее разрушении.

Вторичное облако – облако аварийно химически опасного вещества, образующееся в результате испарения разлившегося вещества с подстилающей поверхности (*подстилающая поверхность* – компоненты земной поверхности, осуществляющие тепло- и влагообмен с атмосферой и оказывающие влияние на ее состояние).

В зоне химического заражения ОХВ могут находиться в капельножидком, парообразном, аэрозольном и газообразном состоянии. *При выбросе в атмосферу газообразных и парообразных химических соединений формируется первичное зараженное облако*, которое в зависимости от плотности газа (пара) по отношению к воздуху будет в той или иной степени рассеиваться в атмосфере. *При разливе (утечке) жидких ОХВ первичное облако образуется за счет мгновенного перехода в атмосферу части ОХВ или вообще не образуется.*

Вторичное облако образуется за счет испарения разлившегося ОХВ.

Первичное облако может быть образовано за счет горячих паров ОХВ, которые получаются в результате взрыва или пожара.

Далее пары охлаждаются, конденсируются и выпадают на землю в виде капель, причем конденсат может быть снесен ветром на значительное расстояние от места аварии.

В случае выброса в атмосферу ОХВ в капельножидком или твердом состоянии капли или твердые частицы ОХВ оседают на местности, что и определяет площадь заражения поверхности почвы. Капельножидкая фракция ОХВ с поверхности земли и объектов испаряется и вновь поднимается в приземные слои атмосферы, образуя вторичное облако.

Частицы твердых ОХВ из аэрозоля под влиянием гравитационного притяжения осаждаются в виде пыли. В аэрозольном облаке, образовавшемся при взрыве, твердые частицы имеют различную величину (1–300 мкм) – чем они крупнее, тем быстрее оседают. При образовании аэрозольного облака частицы размером более 50 мкм (таких большинство) оседают в непосредственной близости от места взрыва. Частицы среднего размера (30–50 мкм) оседают на местность на расстоянии 100–500 м, а мелкие (1–5 мкм) остаются во взвешенном состоянии и распространяются на расстояние 1–10 км и более, что представляет опасность для населения.

Таким образом, зона химического заражения включает две территории:

1) ту, которая подвергается непосредственному воздействию АХОВ;

2) ту, над которой распространяется облако, содержащее АХОВ.

Наибольшую опасность при чрезвычайных ситуациях (ЧС) на ХОО представляют места непосредственного выхода АХОВ в окружающую природную среду и первичное облако.

Концентрация ОХВ в зараженном облаке меняется: наиболее велика концентрация вблизи места выброса, постепенно она снижается к периферии зоны химического заражения по ходу распространения зараженного облака. Концентрация АХОВ по мере движения облака убывает.

Границы зоны заражения отличаются большой изменчивостью, зависящей главным образом от направления потоков воздуха.

Горизонтальное перемещение воздуха происходит под влиянием ветра, в результате чего зараженное облако перемещается и зона химического заражения увеличивается по глубине и фронту.

При большой скорости ветра (более 6 м/с) облако быстро рассеивается и концентрация АХОВ снижается. При умеренной скорости ветра (до 2 м/с) создаются условия, способствующие сохранению зараженного облака в приземном слое атмосферы и распространению его на большую глубину.

Вертикально воздух перемещается вследствие разницы температур на различной высоте от поверхности земли.

Различают *три типа вертикальной устойчивости атмосферы*:

– *инверсию* – состояние приземного слоя воздуха, при котором температура нижнего слоя меньше температуры верхнего слоя (устойчивое состояние атмосферы);

– *изотермию* – состояние приземного слоя воздуха, при котором температура нижнего и верхнего слоев одинакова (безразличное состояние атмосферы);

– *конвекцию* – состояние приземного слоя воздуха, при котором температура нижнего слоя воздуха выше температуры верхнего слоя (неустойчивое состояние атмосферы).

Установлено, что инверсия и в меньшей мере изотермия способствуют сохранению высоких концентраций АХОВ в приземном слое атмосферы и горизонтальному распространению зараженного облака.

На процесс выпадения АХОВ влияют осадки, которые вымывают из зараженного облака жидкие и твердые компоненты химических веществ. Скорость выпадения зависит от вида осадков и диаметра капель. Она минимальна при сухом тумане, мгле, измороси и прогрессивно (в 50–1000 раз)

нарастает при дожде и ливне. Осадки обуславливают гидролиз некоторых АХОВ, что сопровождается их обезвреживанием.

Одним из факторов, влияющих на последствия химического заражения, является характер местности. Общее повышение местности по направлению движения облака уменьшает глубину его распространения, способствует отрыву от приземного слоя и рассеиванию. На вершине возвышенности концентрация яда ниже. Глубокие лощины (овраги, низины вдоль рек) при ветре, близком к их направлению, способствуют перемещению облака вдоль них, и наоборот, при перпендикулярном направлении они могут явиться местом застоя облака.

Лесные массивы задерживают проникновение зараженного облака. В населенных пунктах, как правило, концентрация паров (газов) АХОВ будет выше, чем на открытой местности. По прямым городским улицам АХОВ с воздушным потоком могут распространяться в больших концентрациях, а на соседних, перпендикулярно расположенных улицах их концентрация значительно меньше. Пары АХОВ могут застаиваться в погребах, подвалах. Благодаря естественному процессу воздухообмена некоторые АХОВ проникают в закрытые помещения. Больше всего защищены жилые квартиры, меньше всего – общественные учреждения. Относительно длительное время концентрация АХОВ внутри помещений и вне их будет почти одинаковой.

В случае военных действий, ЧС природного и техногенного характера, когда разрушается полностью или частично ХОО, может произойти выброс (разлив) нескольких различных АХОВ. Тогда зона химического заражения может быть образована АХОВ нескольких типов. По их количеству, физико-химическим свойствам и токсичности определяется масса зараженного облака. В начальной части зоны будут находиться все АХОВ, в наиболее отдаленной части – вещества, преобладающие по количеству и токсодозе. Следует учитывать, что в таком смешанном зараженном облаке возможно химическое взаимодействие между различными АХОВ, в результате чего происходит взрыв, воспламенение, химическая нейтрализация и т. п.

Очаг химического поражения – ограниченная территория, в пределах которой в результате воздействия поражающих факторов химической аварии произошла массовая гибель или поражение людей, сельскохозяйственных животных и растений.

В качестве ориентировочного критерия массовости поражения принято считать наличие одновременно десяти и более пострадавших, нуждающихся в неотложной помощи. Очаг поражения АХОВ в случае их выброса находится внутри зоны химического заражения, в той ее части, где создаются достаточно высокие концентрации яда.

Поскольку очаги химического поражения появляются при различных ЧС (техногенных, природных, военных и др.), на территории очага могут быть поражающие факторы, кроме химического действия, от взрыва, пожара и т. д., поэтому у большинства пострадавших наблюдаются комбинированные поражения (токсическое отравление и травма, токсическое отравление и ожог и т. п.).

При заражении двумя или большим количеством АХОВ существует опасность комбинированного воздействия на организм, приводящего к усилению, ослаблению или извращению токсического эффекта.

Особенности очагов химического поражения АХОВ:

- внезапность появления в зоне химического заражения;
- проникновение АХОВ в организм преимущественно ингаляционным путем, реже через кожу;
- массовость и одновременность санитарных потерь;
- разнообразная клиническая картина поражения, иногда нетипичного характера;
- наличие комбинированных поражений;
- отсутствие в большинстве случаев антидотных средств;
- возможность прогнозирования очагов поражения.

Прогнозирование химической обстановки. Одной из отличительных особенностей зон химического заражения АХОВ является возможность их прогнозирования, так как дислокация химически опасного объекта (ХОО), типы и масса имеющихся АХОВ известны. Исключение составляют зоны химического заражения, образованные в результате химических аварий на железнодорожных станциях, автодорожных магистралях и других объектах.

Исходные данные для прогнозирования масштабов заражения АХОВ:

- общее количество АХОВ на объекте и данные о размещении их запасов в технологических емкостях и трубопроводах;
- количество АХОВ, выброшенных в атмосферу, и характер их разлива на подстилающей поверхности («свободно», «в поддон» или «в обваловку»);
- высота поддона или обваловки складских емкостей;
- метеорологические условия: температура воздуха, скорость ветра на высоте 10 м (на высоте флюгера), степень вертикальной устойчивости воздуха.

Знание поражающих свойств АХОВ, заблаговременное прогнозирование и оценка последствий возможных аварий с их выбросом, умение правильно действовать в таких условиях и ликвидировать последствия аварийных выбросов – необходимые условия обеспечения безопасности населения.

При заблаговременном прогнозировании масштабов заражения на случай производственных аварий в качестве исходных данных рекомендуется принимать:

– количество выброшенного (разлившегося) АХОВ (Q_0) принимают равным максимальному объему АХОВ в одной емкости;

– метеорологические условия: степень вертикальной устойчивости воздуха – изотермия; скорость ветра – 3 м/с; температура воздуха – 20 °С; направление ветра – равновероятное от 0 до 360°.

При прогнозе масштабов заражения по факту аварии используются реальные исходные данные.

Внешняя граница зоны возможного химического заражения рассчитывается по пороговой токсодозе при ингаляционном воздействии на организм человека, которая равна произведению средней концентрации ОХВ в воздухе и времени пребывания человека в зараженном воздухе.

При прогнозировании применяются следующие допущения:

– емкость, содержащая АХОВ, разрушается полностью, и все ее содержимое поступает в окружающую среду;

– при авариях на газо- и продуктопроводах выброс АХОВ принимается равным максимальному количеству АХОВ, содержащемуся в трубопроводе между автоматическими отсекающими, например для аммиакопроводов – 275–500 т;

– толщина h слоя жидкости для АХОВ, разлившихся свободно на подстилающей поверхности, принимается равной 0,05 м по всей площади разлива; для АХОВ, разлившихся в поддон или обваловку, определяется следующим образом:

а) при разливах из емкостей, имеющих самостоятельный поддон (обваловку):

$$h = H - 0,2, \text{ м}, \quad (1.1)$$

где H – глубина поддона (высота обваловки), м;

б) при разливах из емкостей, расположенных группой, имеющих общий поддон (обваловку):

$$h = \frac{Q_0}{F \cdot d}, \text{ м}, \quad (1.2)$$

где Q_0 – количество выброшенного (разлившегося) при аварии вещества, т;

F – реальная площадь разлива в поддон (обваловку), м²;

d – плотность АХОВ, т/м³.

Предельное время пребывания людей в зоне заражения и продолжительность сохранения неизменными метеорологических условий (степень вертикальной устойчивости воздуха, направление и скорость ветра) составляют не более 4 ч. По истечении указанного времени или при изменении метеорологических условий прогноз обстановки уточняется.

В результате оценки химической обстановки определяются:

- время испарения АХОВ;
- глубина зоны заражения;
- площади зон возможного и фактического заражения;
- возможные потери населения.

По степени тяжести отравления пострадавших людей принято подразделять на легкопораженных, средней тяжести и тяжелопораженных. Совокупность всех категорий пораженных, нуждающихся в медицинской помощи, составляют санитарные потери. Число пораженных может изменяться в широких пределах как по величине, так и по структуре, что зависит от химической аварии, количества АХОВ, токсикологических особенностей пострадавших и других факторов.

Расчет глубины зоны возможного химического загрязнения АХОВ осуществляется в следующем порядке:

- определение количественных характеристик выброса АХОВ;
- определение эквивалентного количества АХОВ в первичном облаке;
- определение эквивалентного количества АХОВ во вторичном облаке;
- определение продолжительности поражающего действия АХОВ.

Порядок расчета

Прогнозирование и оценка обстановки при выбросах АХОВ в окружающую среду. Рассмотрим определение продолжительности действия источника химического заражения (время испарения пролива АХОВ).

Время испарения АХОВ ($T_{\text{исп}}$, ч) определяется по формуле

$$T_{\text{исп}} = \frac{h \cdot d}{K_2 \cdot K_4 \cdot K_7}, \text{ ч}, \quad (1.3)$$

где h – толщина слоя разлившегося АХОВ, м;

d – плотность АХОВ (т/м³), определяется по таблице 1.1;

Таблица 1.1 – Характеристики опасных химических веществ и вспомогательные коэффициенты для определения глубин зон заражения [4]

№ п/п	Наименование АХОВ	Плотность, т/м³		Темпе- ратура кипения, °С	Порого- вая ток- содоза, мг·мин/л	Значения вспомогательных коэффициентов							
		газ	жидкость			K ₁	K ₂	K ₃	K ₇				
									для –40 °С	для –20 °С	для 0 °С	для 20 °С	для 40 °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Акролеин	–	0,839	52,7	0,2*	0	0,013	3	0,1	0,2	0,4	1	2,2
2	Аммиак: – хранение под давлением;	0,0008	0,681	–33,42	15	0,18	0,025	0,004	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,4}{1}$
	– изотермическое хранение	–	0,681	–33,42	15	0,01	0,025	0,04	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1}{1}$
3	Ацетонитрил	–	0,786	81,6	21,8**	0	0,004	0,028	0,02	0,1	0,3	1	2,6
4	Ацетонциан- гидрин	–	0,932	120	1,9**	0	0,002	0,316	0	0	0,3	1	1,5
5	Водород мышьяковистый	0,0035	1,64	–62,47	0,2**	0,17	0,054	3	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{0,8}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,2}{1}$
6	Водород фтористый	–	0,989	19,52	4	0	0,028	0,15	0,1	0,2	0,5	1	1
7	Водород хлористый	0,0016	1,191	–85,1	2	0,28	0,037	0,3	$\frac{0,4}{1}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{0,8}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,2}{1}$
8	Водород бромистый	0,0036	1,49	–66,77	2,4*	0,13	0,055	0,25	$\frac{0,2}{1}$	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{0,8}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,2}{1}$
9	Водород цианистый	–	0,687	25,7	0,2	0	0,026	3	0	0	0,4	1	1,3
10	Диметиламин	0,002	0,68	6,9	1,2*	0,06	0,041	0,5	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0}{0,8}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,5}{1}$
11	Метиламин	0,0014	0,699	–6,5	1,2*	0,13	0,034	0,5	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0}{0,7}$	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,8}{1}$

Продолжение таблицы 1.1

№ п/п	Наименование АХОВ	Плотность, т/м³		Темпе- ратура кипения, °С	Порого- вая ток- содоза, мг·мин/л	Значения вспомогательных коэффициентов							
		газ	жидкость			K ₁	K ₂	K ₃	K ₇				
									для –40 °С	для –20 °С	для 0 °С	для 20 °С	для 40 °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
12	Метил бромистый	–	1,732	3,6	1,2*	0,04	0,039	0,5	$\frac{0}{0,2}$	$\frac{0}{0,4}$	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,3}{1}$
13	Метил хлористый	0,0023	0,983	–23,76	10,8**	0,125	0,044	0,056	$\frac{0}{0,5}$	$\frac{0,1}{1}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,5}{1}$
14	Метилакрилат	–	0,953	80,2	6*	0	0,005	0,1	0,1	0,2	0,4	1	3,1
15	Метилмеркаптан	–	0,867	5,95	1,7**	0,06	0,043	0,353	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0}{0,8}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,4}{1}$
16	Нитрил акриловой кислоты	–	0,806	77,3	0,75	0	0,007	0,08	0,04,	0,1	0,4	1	2,4
17	Окислы азота	–	1,491	21	1,5	0	0,04	0,4	0	0	0,4	1	1
18	Окись этилена	–	0,882	10,7	2,2**	0,05	0,041	0,27	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0}{0,7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3,2}{1}$
19	Сернистый ангидрид	0,0029	1,462	–10,1	1,8	0,11	0,049	0,333	$\frac{0}{0,2}$	$\frac{0}{0,5}$	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,7}{1}$
20	Сероводород	0,0015	0,964	–60,35	16,1	0,27	0,042	0,036	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{0,8}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,2}{1}$
21	Сероуглерод	–	1,263	46,2	45	0	0,021	0,013	0,1	0,2	0,4	1	2,1
22	Соляная кислота (концентрированная)	–	1,198	–	2	0	0,021	0,3	0	0,1	0,3	1	1,6
23	Триметиламин	–	0,671	2,9	6*	0,07	0,047	0,1	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,4}$	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,2}{1}$
24	Формальдегид	–	0,815	–19	0,6*	0,19	0,034	1	$\frac{0}{0,4}$	$\frac{0}{1}$	$\frac{0,5}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,5}{1}$

Продолжение таблицы 1.1

№ п/п	Наименование АХОВ	Плотность, т/м³		Темпе- ратура кипения, °С	Порого- вая ток- содоза, мг·мин/л	Значения вспомогательных коэффициентов							
		газ	жидкость			K ₁	K ₂	K ₃	K ₇				
									для –40 °С	для –20 °С	для 0 °С	для 20 °С	для 40 °С
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
25	Фосген	0,0035	1,432	8,2	0,6	0,05	0,061	1	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0}{0,7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,7}{1}$
26	Фтор	0,0017	1,512	–188,2	0,2*	0,95	0,038	3	$\frac{0,7}{1}$	$\frac{0,8}{1}$	$\frac{0,9}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,1}{1}$
27	Фосфор треххлористый	–	1,57	75,3	3	0	0,01	0,2	0,1	0,2	0,4	1	2,3
28	Хлор	0,0032	1,558	–34,1	0,6	0,18	0,052	1	$\frac{0}{0,9}$	$\frac{0,3}{1}$	$\frac{0,6}{1}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,4}{1}$
29	Хлорпикрин	–	1,658	112,3	0,02	0	0,002	30	0,03	0,1	0,3	1	2,9
30	Хлорциан	0,0021	1,22	12,6	0,75	0,04	0,048	0,8	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0,6}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{3,9}{1}$
31	Этиленимин	–	0,838	55	4,8	0	0,009	0,125	0,05	0,1	0,4	1	2,2

Примечания

1 Плотность газообразных АХОВ в графе 3 приведена при атмосферном давлении; при давлении в емкости, отличном от атмосферного, данные значения плотности умножают на значение давления в атмосферах (1 атм = 760 мм рт. ст.).

2 В графах 10–14 в числителе значения коэффициента K₇ для первичного, в знаменателе – для вторичного облака.

3 В графе 6 численные значения пороговой токсодозы, помеченные звездочками, определены ориентировочно расчетом по соотношению

$$П = 240 \cdot K \cdot ПДК_{р.з.},$$

где П – токсодоза, мг·мин/л; ПДК_{р.з.} – ПДК в воздухе рабочей зоны по ГОСТ 12.1.005–88, мг/л; K = 5 – для раздражающих газов (помечены *); K = 9 – для всех прочих ядов (помечены **).

4 Значение K₁ для изотермического хранения аммиака приведено для случая разливов (выбросов) в поддон.

K_2 – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ, определяется по таблице 1.1;

K_4 – коэффициент, учитывающий скорость ветра, определяется по таблице 1.2;

K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, определяется по таблице 1.1 (значение берется в знаменателе).

Таблица 1.2 – Значения коэффициента K_4 в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15
K_4	1	1,33	1,67	2	2,34	2,67	3	3,34	3,67	4	5,68

При отсутствии данных о состоянии атмосферы степень ее устойчивости определяют по таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Определение степени вертикальной устойчивости (СВУ) воздуха по прогнозу погоды (коэффициент K_5)

Скорость ветра по прогнозу погоды, м/с	Степень вертикальной устойчивости							
	ночью		утром		днем		вечером	
	безоблачно, переменная облачность	сплошная облачность	безоблачно, переменная облачность	сплошная облачность	безоблачно, переменная облачность	сплошная облачность	безоблачно, переменная облачность	сплошная облачность
< 2	ин	из	из (ин)	из	к (из)	из	ин	из
2–4	ин	из	из (ин)	из	из	из	из (ин)	из
> 4	из	из	из	из	из	из	из	из

Примечания

1 Обозначения, принятые в таблице: из – изотермия, ин – инверсия, к – конвекция. Обозначения в скобках указаны для снежного покрова.

2 К утру относят период времени в течение 2 ч после восхода солнца; к вечеру – период времени в течение 2 ч после захода солнца; ко дню – период времени от восхода до захода солнца, не включая 2 ч утром; к ночи – период времени от захода до восхода солнца, не включая 2 ч вечером.

3 K_5 при инверсии принимать равным 1,0; при изотермии – 0,23; при конвекции – 0,08.

4 При прогнозировании масштабов возможного заражения АХОВ в качестве исходных метеорологических условий рекомендовано принимать: СВУ – изотермия; скорость ветра – 3 м/с; температура воздуха – 20 °С; направление ветра – равновероятное от 0 до 360°.

Глубину зоны возможного химического заражения определяют по таблице 1.4. Скорость переноса переднего фронта облака АХОВ в зависимости от скорости ветра и степени вертикальной устойчивости воздуха принимают по таблице 1.5.

18 Таблица 1.4 – Глубина зоны возможного заражения АХОВ в зависимости от эквивалентного количества вещества в первичном и (или) вторичном облаке и скорости ветра

Скорость ветра, м/с	Эквивалентное количество АХОВ, т																
	0,01	0,05	0,1	0,5	1	3	5	10	20	30	50	70	100	300	500	1000	2000
	Глубина возможного заражения, км																
1 и менее	0,38	0,85	1,25	3,16	4,75	9,18	12,53	19,20	29,56	38,13	52,67	65,23	81,91	166	231	363	572
2	0,26	0,59	0,84	1,92	2,84	5,35	7,20	10,83	16,44	21,02	28,73	35,35	44,09	87,79	121	189	295
3	0,22	0,48	0,68	1,53	2,17	3,96	5,34	7,96	11,94	15,18	20,59	25,21	31,30	61,47	84,50	130	202
4	0,19	0,42	0,59	1,38	1,88	3,28	4,36	6,46	9,62	12,18	16,43	20,05	24,80	48,18	65,92	101	157
5	0,17	0,38	0,53	1,19	1,68	2,19	3,75	5,53	8,19	10,33	13,88	16,89	20,82	40,11	64,67	83,6	129
6	0,15	0,34	0,48	1,09	1,53	2,66	3,43	4,88	7,20	9,06	12,14	14,79	18,13	34,67	47,09	71,7	110
7	0,14	0,32	0,45	1,00	1,42	2,46	3,17	4,49	6,48	8,14	10,87	13,17	16,17	30,736	41,60	63,1	96,30
8	0,13	0,30	0,42	0,94	1,33	2,30	2,97	4,20	5,92	7,42	9,90	11,98	14,68	27,75	37,50	56,7	86,20
9	0,12	0,28	0,40	0,88	1,25	2,17	2,80	3,96	5,60	6,86	9,12	11,03	13,50	25,39	34,20	51,6	78,30
10	0,12	0,26	0,38	0,84	1,19	2,06	2,66	3,76	5,31	5,50	8,50	10,23	12,54	23,49	31,60	47,5	71,90
11	0,11	0,25	0,36	0,80	1,13	1,96	2,53	3,58	5,06	6,20	8,01	9,61	11,74	21,91	29,40	44,1	66,62
12	0,11	0,24	0,34	0,76	1,08	1,88	2,42	3,43	4,85	5,94	7,67	9,07	11,06	20,58	27,60	41,3	62,20
13	0,10	0,23	0,33	0,74	1,04	1,80	2,37	3,29	4,66	5,70	7,37	8,72	10,48	19,45	26,00	38,9	58,44
14	0,10	0,22	0,32	0,71	1,00	1,74	2,24	3,17	4,49	5,50	7,10	8,40	10,04	18,46	24,60	36,8	55,20
15 и более	0,10	0,22	0,31	0,69	0,97	1,68	2,17	3,07	4,34	5,31	6,86	8,11	9,70	17,60	23,50	34,9	52,37

Таблица 1.5 – Скорость переноса переднего фронта облака АХОВ, км/ч, в зависимости от скорости ветра, м/с

Состояние приземного слоя воздуха	Значение скорости переноса переднего фронта облака АХОВ, км/ч, при скорости ветра, м/с												
	≤ 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	≥ 15
Инверсия	5	10	16	21	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Изотермия	6	12	18	24	29	35	41	47	53	59	65	71	89
Конвекция	7	14	21	28	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Порядок нанесения зон заражения на карту и схему СТБ 1518-2004. Зона возможного заражения облаком АХОВ на картах (схемах) ограничена окружностью, полуокружностью или сектором, имеющими угловые размеры φ , зависящие от скорости ветра и указанные в таблице 1.6, а радиус равен расчетной глубине зоны заражения ($G_{з.расч}$).

Таблица 1.6 – Угловые размеры зоны возможного заражения АХОВ в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра, м/с	< 0,5	0,6–1,0	1,1–2	> 2
φ , град	360	180	90	45

Точка «0» на карте (схеме) соответствует источнику заражения. Биссектриса сектора совпадает с осью следа облака и ориентирована по направлению ветра (рисунок 1.1).

Направление биссектрисы сектора совпадает с направлением ветра. За нулевое направление принимают северный ветер. Зона возможного заражения наносится на карту (схему) желтым цветом.

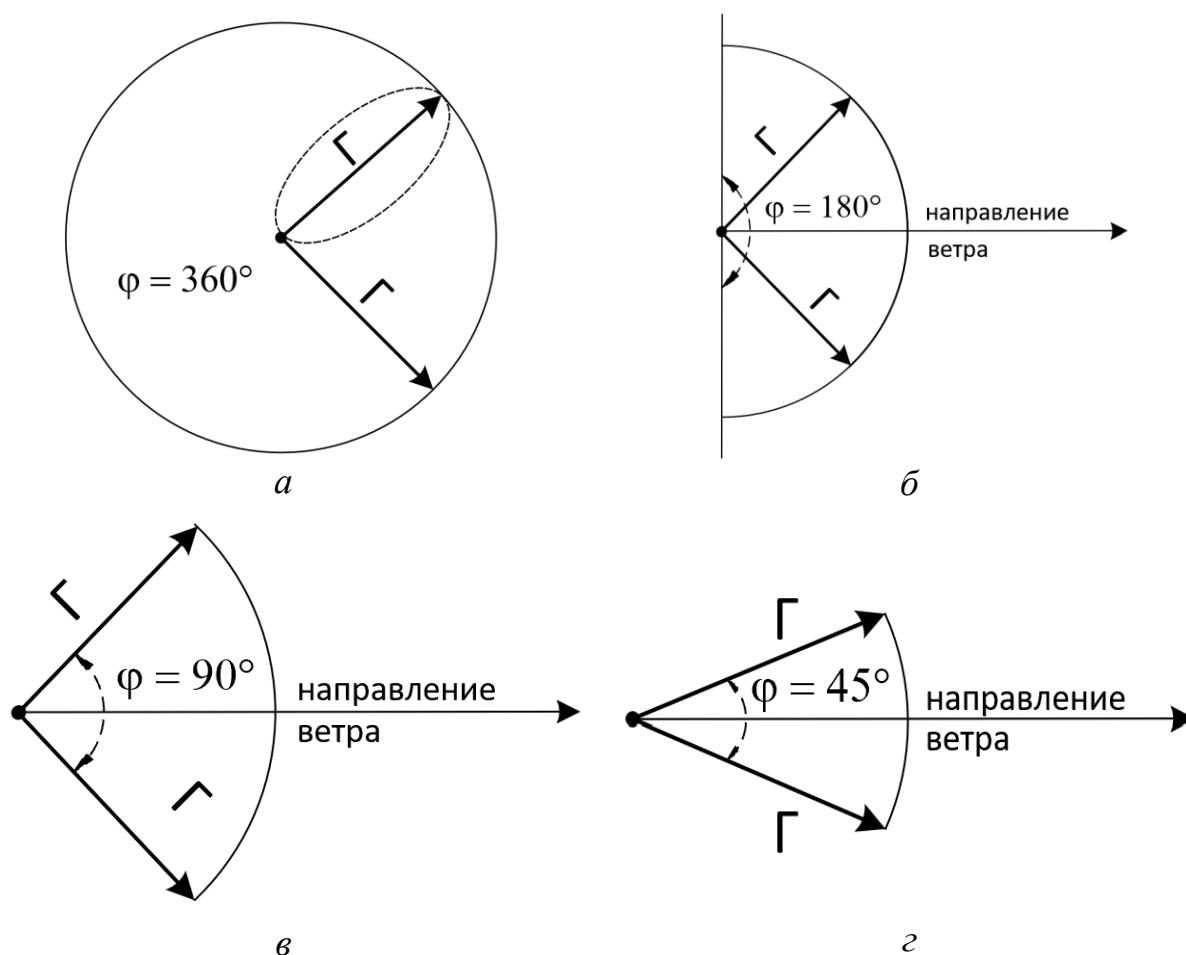
Зона фактического заражения, имеющая форму эллипса, включается в зону возможного заражения. Ввиду возможных перемещений облака АХОВ под действием изменений направления ветра зона фактического заражения на картах (схемах) наносится пунктиром красного цвета.

Площадь разлива (пролива) жидкого АХОВ (источник заражения) обозначают только на крупномасштабных схемах или картах. В остальных случаях источник заражения принимают за точку, из которой происходит распространение паров ядовитого облака.

Рядом с источником заражения черным цветом записывают данные:

– в числителе – наименование и количество выброшенного в окружающую среду АХОВ;

– в знаменателе – дата и время выброса ядовитого вещества.



$a - \varphi = 360^\circ$ при $v \leq 0,5$ м/с; $б - \varphi = 180^\circ$ при $v = 0,6-1$ м/с;
 $в - \varphi = 90^\circ$ при $v = 1,1-2$ м/с; $г - \varphi = 45^\circ$ при $v > 2$ м/с

Рисунок 1.1 – Конфигурация зоны возможного заражения АХОВ в зависимости от скорости ветра в приземном слое

Границы зоны возможного заражения наносят на схемы и карты для выработки и принятия решения по организации защиты производственного персонала объектов и населения.

Схема зоны возможного и фактического заражения при скорости ветра меньше 0,5 м/с показана на рисунке 1.2.

При скорости ветра от 1,1 до 2 м/с схема зоны химического заражения будет иметь вид, показанный на рисунке 1.3.

Характеристика погодных условий с указанием времени и даты определения метеоусловий заносится в верхний правый или левый угол карты (схемы) в виде квадрата, который наносится сплошной линией (рисунок 1.4).

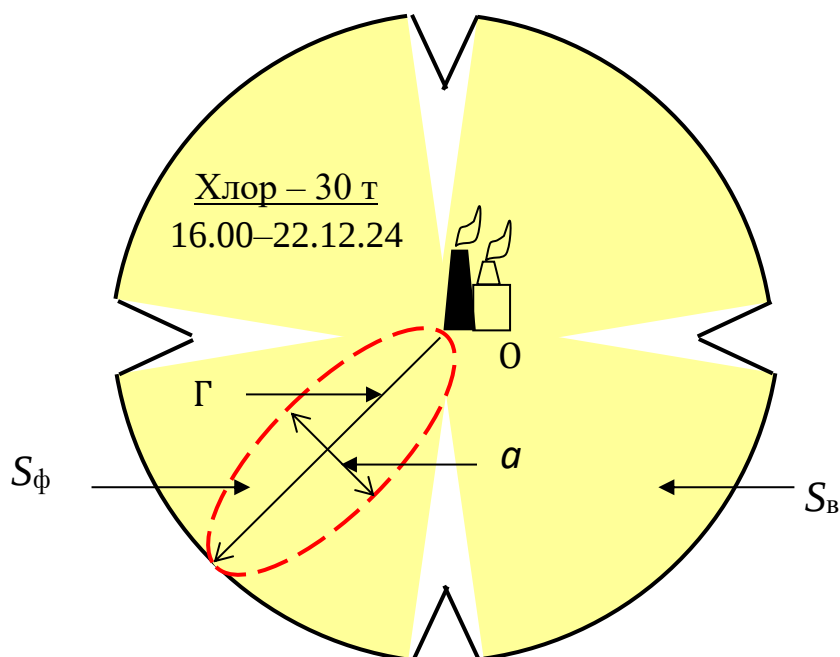


Рисунок 1.2 – Схема зоны химического заражения территории при скорости ветра меньше 0,5 м/с: точка «0» – источник заражения; Γ – глубина зоны возможного заражения АХОВ, км; $S_{\text{в}}$ – площадь зоны возможного заражения, км²; $S_{\text{ф}}$ – площадь зоны фактического заражения, км²; a – ширина зоны фактического заражения

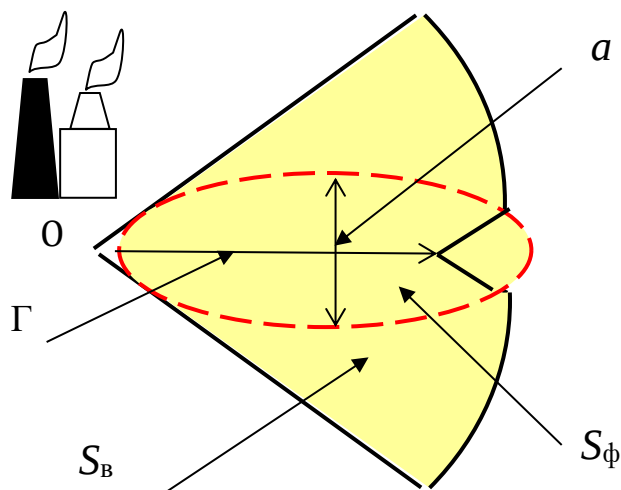


Рисунок 1.3 – Схема зоны химического заражения территории при скорости ветра от 1,1 до 2 м/с: точка «0» – источник заражения; Γ – глубина зоны возможного заражения, км; $S_{\text{в}}$ – площадь зоны возможного заражения, км²; $S_{\text{ф}}$ – площадь зоны фактического заражения, км²; a – ширина зоны фактического заражения

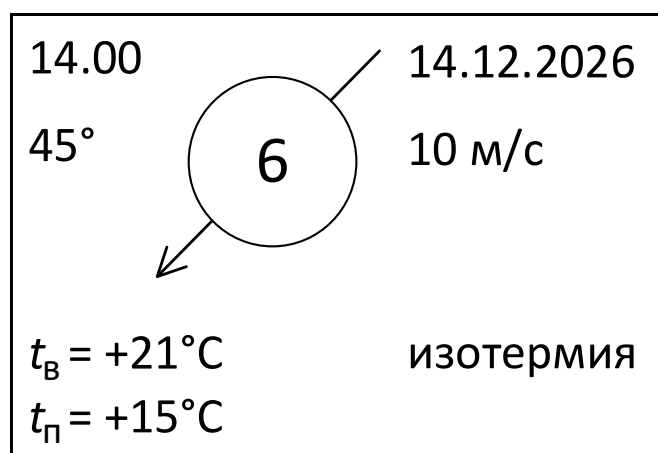


Рисунок 1.4 – Характеристика метеоусловий:

14.00, 14.12.2026 – время и дата, для которых приводятся метеоусловия;

45° – направление ветра в градусах; 10 м/с – скорость ветра, м/с;

6 – облачность в баллах; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °C; $t_{\text{п}}$ – температура почвы, °C; изотермия – степень вертикальной устойчивости

При обозначении прогноза прямоугольник наносится пунктиром.

Определение возможных потерь населения в очаге химического поражения. Возможные потери персонала и населения в очаге поражения определяются по таблице 1.7 в зависимости от обеспеченности людей средствами индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) и условий нахождения людей.

Таблица 1.7 – Возможные потери персонала и населения в очаге поражения АХОВ

Условия нахождения людей	Обеспеченность населения и персонала СИЗОД, %									
	без СИЗОД	20	30	40	50	60	70	80	90	100
На открытой местности	90–100	75	65	58	50	40	35	25	18	10
В укрытиях, зданиях	50	40	35	30	27	22	18	14	9	4

Ориентировочная структура потерь людей в очаге поражения АХОВ составит:

- 25 % – санитарные потери легкой формы тяжести (I степень);
- 40 % – санитарные потери средней и тяжелой формы тяжести, обязательна госпитализация (II и III степени);
- 35 % – безвозвратные потери, смертельный исход (IV степень).

При распространении зараженного воздуха АХОВ за пределами города возможное количество пострадавших определяется по формуле

$$N = S_{\phi} \left[\frac{\Gamma_r}{\Gamma_{з.расч}} \cdot \rho \cdot K + \left(1 - \frac{\Gamma_r}{\Gamma_{з.расч}} \right) \cdot \rho' \cdot K' \right], \quad (1.4)$$

где N – общие потери людей в очаге поражения АХОВ, чел.;

S_{ϕ} – площадь зоны фактического заражения АХОВ, км²;

Γ_r – глубина зоны распространения облака, зараженного АХОВ, в городе (определяется как доля от расчетной глубины зоны заражения для $T_{ав} = 4$ ч;

$\Gamma_r = D_{г.з} \Gamma_{з.пред}$), км;

$\Gamma_{з.расч}$ – расчетная глубина зоны заражения АХОВ, км;

ρ, ρ' – средняя плотность людей соответственно в городе и загородной зоне, чел./км²;

K, K' – доля незащищенного населения соответственно в городе и загородной зоне.

Доля незащищенного населения вычисляется по следующим формулам:

$$K = (1 - n_1)(1 - n_2), \quad (1.5)$$

$$K' = (1 - n'_1)(1 - n'_2), \quad (1.6)$$

где n_1, n'_1 – доля населения, обеспеченного СИЗОД, соответственно в городе и загородной зоне;

n_2, n'_2 – доля населения, обеспеченного коллективными средствами защиты, соответственно в городе и загородной зоне.

Пример решения задачи

Задача. Оценить обстановку при аварии на химически опасном объекте и построить ситуационный план аварии с указанием границ зон возможного и фактического заражения. Определить продолжительность действия химического источника заражения, глубину и площади зон возможного и фактического химического заражения на время после аварии (1, 2 и 4 ч) и на время действия химического источника заражения, ожидаемое время распространения зоны заражения АХОВ до объекта экономики, возможное число пострадавших среди населения и их структуру.

Исходные данные:

- количество АХОВ в емкости $Q_0 = 380$ т хлора (сжиженное состояние);
- дата и время аварии – 25 июля 2025, 3.00;
- метеоусловия: безоблачно, скорость ветра $v = 1,8$ м/с, направление ветра = 340° , температура воздуха = $+16^\circ\text{C}$);
- высота обваловки $H = 3$ м;
- доля глубины заражения в городе $D_{г.з} = 0,7$;
- средняя плотность населения в городе $\rho = 2800$ чел./км²;
- средняя плотность населения в загородной зоне $\rho' = 189$ чел./км²;
- доля населения, обеспеченного СИЗОД, в городе $n_1 = 47\%$;
- доля населения, обеспеченного СИЗОД, в загородной зоне $n'_1 = 8\%$;
- доля населения, обеспеченного коллективными средствами защиты, в городе $n_2 = 38\%$;
- доля населения, обеспеченного коллективными средствами защиты, в загородной зоне $n'_2 = 3\%$;
- расстояние от объекта экономики до химически опасного объекта (ХОО) $L = 60$ км.

Решение

1 Прогнозирование и оценка обстановки при выбросах АХОВ в окружающую среду.

Рассмотрим определение продолжительности действия источника химического заражения (время испарения пролива АХОВ).

Время испарения АХОВ ($T_{\text{исп}}$, ч) определяется по формуле (1.3):

$$T_{\text{исп}} = \frac{h \cdot d}{K_2 \cdot K_4 \cdot K_7}, \text{ ч},$$

где h – толщина слоя разлившегося АХОВ, определяется по формуле (1.1) или (1.2), м. По условиям задачи емкость имеет самостоятельный поддон, высота обваловки H равна 3 м. Следовательно, по формуле (1.1) рассчитываем h :

$$h = H - 0,2 = 3 - 0,2 = 2,8 \text{ м};$$

d – плотность АХОВ (т/м³), определяется по таблице 1.1. Плотность хлора $d = 1,558$ т/м³ (для решения индивидуального задания берем плотность АХОВ для жидкого состояния);

K_2 – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ, определяется по таблице 1.1. Для хлора $K_2 = 0,052$;

K_4 – коэффициент, учитывающий скорость ветра, определяется по таблице 1.2. По условию задачи скорость ветра v равна 1,8 м/с, в таблице 1.2 приведены значения K_4 для скорости ветра 1 и 2 м/с, запишем их в таблицу 1.8. Чтобы рассчитать K_4 для скорости ветра 1,8 м/с, воспользуемся формулой линейной интерполяции (1.7), которая имеет вид

$$f(x) = f(x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \cdot (x - x_i). \quad (1.7)$$

Таблица 1.8 – Данные для расчета K_4

$x = v = 1,8$	$f(x) = K_4 = ?$
$x_1 = 1$	$f(x_1) = 1$
$x_2 = 2$	$f(x_2) = 1,33$

$$K_4(v) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) = 1 + \frac{1,33 - 1}{2 - 1} \cdot (1,8 - 1) = 1,264.$$

Таким образом, K_4 равен 1,264 для скорости ветра 1,8 м/с;

K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, определяется по таблице 1.1 (значение берется в знаменателе). $K_7 = 1$ (из таблицы 1.1 для температуры 16 °С, при необходимости K_7 рассчитываем, используя формулу линейной интерполяции (1.7)).

Таким образом, определив значения всех переменных, рассчитаем время испарения АХОВ по формуле (1.3):

$$T_{\text{исп}} = \frac{h \cdot d}{K_2 \cdot K_4 \cdot K_7} = \frac{2,8 \cdot 1,558}{0,052 \cdot 1,264 \cdot 1} = 66,37 \text{ ч.}$$

2 Определение эквивалентного количества химического вещества.

Масштабы заражения АХОВ в зависимости от физических свойств и агрегатного состояния рассчитываются для первичного и вторичного облаков следующим образом:

- для сжиженных газов – отдельно для первичного и вторичного;
- для сжатых газов – только для первичного;
- для ядовитых жидкостей с температурой кипения выше температуры окружающей среды – только для вторичного.

Для упрощения расчетов глубин зон заражения вводится понятие «эквивалентное количество АХОВ», под которым понимается такое количество хлора, масштаб заражения которым при инверсии эквивалентен масштабу заражения при данной степени вертикальной устойчивости воздуха количеством данного АХОВ, перешедшим в первичное (вторичное) облако.

Эквивалентное количество АХОВ ($Q_{э1}, т$) в первичном облаке определяется по формуле

$$Q_{э1} = K_1 \cdot K_3 \cdot K_5 \cdot K_7 \cdot Q_0, \quad (1.8)$$

где $Q_{э1}$ – эквивалентное количество АХОВ в первичном облаке, т;

K_1 – коэффициент, зависящий от условий хранения АХОВ, определяется по таблице 1.1. Для хлора $K_1 = 0,18$;

K_3 – коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе другого АХОВ, определяется по таблице 1.1; $K_3 = 1$;

K_5 – коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости воздуха, определяется по таблице 1.3. Так как авария произошла ночью при безоблачной погоде и скорости ветра меньше 2 м/с, то степень вертикальной устойчивости атмосферы по таблице 1.3 – инверсия. Следовательно, $K_5 = 1$;

K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, определяется по таблице 1.1 (*значение берется в числителе*). По условию задачи температура воздуха составила 16 °С. Используя формулу линейной интерполяции (1.7), рассчитаем значение K_7 для температуры воздуха 16 °С. Из таблицы 1.1 выпишем значения K_7 при температурах воздуха 0 и 20 °С, данные для расчета K_7 при температуре воздуха 16 °С сведем в таблицу 1.9.

Таблица 1.9 – Данные для расчета K_7

$x = T_{\text{возд}} = 16$	$f(x) = K_7 = ?$
$x_1 = 0$	$f(x_1) = 0,6$
$x_2 = 20$	$f(x_2) = 1$

$$K_7(T_{\text{возд}}) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) = 0,6 + \frac{1 - 0,6}{20 - 0} \cdot (16 - 0) = 0,92.$$

Таким образом, K_7 равен 0,92 для температуры воздуха 16 °С;

Q_0 – количество выброшенного (разлившегося) при аварии АХОВ, т (по условию $Q_0 = 380$ т хлора).

Определим эквивалентное количество вещества в первичном облаке по формуле (1.8):

$$Q_{\text{э1}} = K_1 \cdot K_3 \cdot K_5 \cdot K_7 \cdot Q_0 = 0,18 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,92 \cdot 380 = 62,928 \text{ т.}$$

Эквивалентное количество вещества во вторичном облаке ($Q_{\text{э2}}$, т) рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{э2}} = (1 - K_1) \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot \frac{Q_0}{h \cdot d}, \text{ т,} \quad (1.9)$$

где K_1, K_3, K_5, Q_0 – см. формулу (1.8);

K_2, K_4, h, d – см. формулу (1.3);

K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, определяется по таблице 1.1, *берется в знаменателе – для вторичного облака*;

K_6 – коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после аварии ($T_{\text{ав}}$, по условию рассматриваемое время после аварии 1, 2 и 4 ч), или времени испарения АХОВ ($T_{\text{исп}}$, ч) рассчитываемого по формуле (1.3), определяется по формуле (1.10). Значение коэффициента K_6 определяется после расчета продолжительности испарения ($T_{\text{исп}}$, ч) пролива АХОВ:

$$K_6 = \begin{cases} T_{\text{ав}}^{0,8} & \text{при } T_{\text{ав}} < T_{\text{исп}}, \\ T_{\text{исп}}^{0,8} & \text{при } T_{\text{ав}} \geq T_{\text{исп}}. \end{cases} \quad (1.10)$$

Определим эквивалентное количество хлора во вторичном облаке после аварии $T_{\text{ав}}$ (спустя 1, 2 и 4 ч) при расчетном времени испарения АХОВ $T_{\text{исп}} = 66,37$ ч.

Далее определим значение K_6 при $T_{\text{ав}}$ равно 1, 2 и 4 ч и $T_{\text{исп}}$, ч.

При $T_{\text{ав}} = 1$ ч, $T_{\text{ав}} < T_{\text{исп}} \Rightarrow K_6 = 1^{0,8} = 1$.

По таблице 1.1 коэффициент K_7 для вторичного облака (значение в знаменателе) для температур 0 и 20 °С равен 1, следовательно, K_7 для

температуры 16 °С равен 1. При необходимости K_7 рассчитываем, используя формулу линейной интерполяции (1.7).

Рассчитаем эквивалентное количество хлора во вторичном облаке $Q_{э2}$ по формуле (1.9) спустя 1 ч после аварии:

$$Q_{э2} = (1 - 0,18) \cdot 0,052 \cdot 1 \cdot 1,264 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot \frac{380}{2,8 \cdot 1,558} = 4,695 \text{ т.}$$

$$\text{При } T_{ав} = 2 \text{ ч, } T_{ав} < T_{исп} \Rightarrow K_6 = 2^{0,8} = 1,741.$$

Следовательно, эквивалентное количество хлора во вторичном облаке $Q_{э2}$ спустя 2 ч после аварии равно

$$Q_{э2} = (1 - 0,18) \cdot 0,052 \cdot 1 \cdot 1,264 \cdot 1 \cdot 1,741 \cdot 1 \cdot \frac{380}{2,8 \cdot 1,558} = 8,174 \text{ т.}$$

$$\text{При } T_{ав} = 4 \text{ ч, } T_{ав} < T_{исп} \Rightarrow K_6 = 4^{0,8} = 3,031.$$

Следовательно, эквивалентное количество хлора во вторичном облаке $Q_{э2}$ спустя 4 ч после аварии равно

$$Q_{э2} = (1 - 0,18) \cdot 0,052 \cdot 1 \cdot 1,264 \cdot 1 \cdot 3,031 \cdot 1 \cdot \frac{380}{2,8 \cdot 1,558} = 14,232 \text{ т.}$$

$$\text{При } T_{исп} = 66,37 \text{ ч} \Rightarrow K_6 = 66,37^{0,8} = 28,68.$$

Следовательно, эквивалентное количество хлора во вторичном облаке $Q_{э2}$ спустя 66,37 ч после аварии равно

$$Q_{э2} = (1 - 0,18) \cdot 0,052 \cdot 1 \cdot 1,264 \cdot 1 \cdot 28,68 \cdot 1 \cdot \frac{380}{2,8 \cdot 1,558} = 134,649 \text{ т.}$$

3 Определение глубины зоны заражения.

Под глубиной зоны заражения понимается расстояние от источника химического заражения до внешней границы зоны заражения АХОВ, определенной пороговой токсодозой при ингаляционном воздействии на организм человека.

Определение глубины зоны заражения как по первичному, так и по вторичному облаку ведется с помощью таблицы 1.4. Исходными данными при этом служат:

- способ хранения сжиженного АХОВ в емкости;
- количество АХОВ, перешедшее из резервуара в окружающую среду;
- характер разлива сжиженного АХОВ на подстилающей поверхности («свободно», «в поддон» или «в обваловку»);
- метеорологические условия: степень вертикальной устойчивости воздуха (инверсия, изотермия или конвекция), скорость приземного ветра по данным прогноза и температура окружающего воздуха.

В зависимости от полученного по формулам (1.8) и (1.9) эквивалентного количества вещества и скорости ветра по таблице 1.4 определяют глубины зон заражения первичным Γ_1 и (или) вторичным Γ_2 облаком АХОВ.

Определим значение глубины заражения первичным облаком Γ_1 для эквивалентного количества вещества по первичному облаку $Q_{э1} = 62,928$ т и скорости ветра 1,8 м/с. Для этого сначала рассчитаем Γ_1 при скорости ветра 1 и 2 м/с, а затем выполним расчет для Γ_1 при скорости ветра 1,8 м/с.

Используя формулу линейной интерполяции (1.7), рассчитаем значение глубины зоны заражения первичным облаком Γ_1 для эквивалентного количества вещества по первичному облаку $Q_{э1} = 62,928$ т при скорости ветра 1 м/с.

По таблице 1.4 определим значения глубины зон возможного заражения первичным облаком Γ_1 для эквивалентного количества АХОВ $Q_{э1}$, равного 50 и 70 т при скорости ветра 1, 2 и 1,8 м/с соответственно.

Данные сводим в таблицы 1.10–1.12.

Таблица 1.10 – Данные для расчета Γ_1 при скорости ветра 1 м/с

$x = Q_{э1} = 62,928$	$f(x) = \Gamma_1 = ?$
$x_1 = 50$	$f(x_1) = 52,67$
$x_2 = 70$	$f(x_2) = 65,23$

$$\begin{aligned} \Gamma_1(Q_{э1})_{1 \text{ м/с}} &= f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) = \\ &= 52,67 + \frac{65,23 - 52,67}{70 - 50} \cdot (62,928 - 50) = 60,789 \text{ км.} \end{aligned}$$

Таким образом, глубина зоны заражения первичным облаком Γ_1 для эквивалентного количества вещества по первичному облаку $Q_{э1} = 62,928$ т при скорости ветра 1 м/с равна 60,789 км.

Таблица 1.11 – Данные для расчета Γ_1 при скорости ветра 2 м/с

$x = Q_{э1} = 62,928$	$f(x) = \Gamma_1 = ?$
$x_1 = 50$	$f(x_1) = 28,73$
$x_2 = 70$	$f(x_2) = 35,35$

$$\begin{aligned}\Gamma_1(Q_{э1})_{2\frac{м}{с}} &= f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) = \\ &= 28,73 + \frac{35,35 - 28,73}{70 - 50} \cdot (62,928 - 50) = 33,009 \text{ км.}\end{aligned}$$

Таким образом, глубина зоны заражения первичным облаком Γ_1 для эквивалентного количества вещества по первичному облаку $Q_{э1} = 62,928$ т при скорости ветра 2 м/с равна 30,009 км.

Таблица 1.12 – Данные для расчета Γ_1 при скорости ветра 1,8 м/с

$x = v = 1,8$	$f(x) = \Gamma_1 = ?$
$x_1 = 1$	$f(x_1) = 60,789$
$x_2 = 2$	$f(x_2) = 33,009$

$$\begin{aligned}\Gamma_1(v) &= f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) = \\ &= 60,789 + \frac{33,009 - 60,789}{2 - 1} \cdot (1,8 - 1) = 38,565 \text{ км.}\end{aligned}$$

Таким образом, глубина зоны заражения первичным облаком Γ_1 для эквивалентного количества вещества по первичному облаку $Q_{э1} = 62,928$ т и скорости ветра 1,8 м/с равна 38,565 км.

Далее определим значения глубины зон заражения вторичным облаком Γ_2 для рассчитанного эквивалентного количества вещества $Q_{э2}$ спустя 1, 2 и 4 ч после начала аварии и для расчетного времени испарения АХОВ $T_{исп}$, равного 66,37 ч при заданной по условию задачи скорости ветра 1,8 м/с.

Сведем в таблицу 1.13 полученные результаты.

Определим значения глубины зон заражения вторичным облаком Γ_2 для расчетного эквивалентного количества вещества по вторичному облаку $Q_{э2}$ при скорости ветра 1,8 м/с спустя 1, 2 и 4 ч и для расчетного $T_{исп}$ после аварии.

Таблица 1.13 – Результаты расчета эквивалентного количества вещества по вторичному облаку $Q_{э2}$ спустя время после начала аварии

Вторичное облако	Время от начала аварии, ч			
	$T_{ав} = 1$	$T_{ав} = 2$	$T_{ав} = 4$	$T_{исп} = 66, 37$
$Q_{э2}, \text{т}$	4,695	8,174	14,232	134,649

Сначала рассчитаем Γ_2 при скорости ветра 1 и 2 м/с, а затем выполним расчет для Γ_2 при скорости ветра 1,8 м/с спустя 1 ч после аварии.

Используя формулу линейной интерполяции (1.7), рассчитаем глубину зоны заражения вторичным облаком Γ_2 при скорости ветра 1 м/с для эквивалентного количества вещества по вторичному облаку $Q_{э2} = 4,695 \text{ т}$ спустя 1 ч после аварии. По таблице 1.4 определим значения глубины зоны возможного заражения вторичным облаком Γ_2 для эквивалентного количества АХОВ $Q_{э2}$, равного 3 и 5 т при скорости ветра 1 м/с.

Данные сводим в таблицу 1.14.

Таблица 1.14 – Данные для расчета Γ_2 при скорости ветра 1 м/с

$x = Q_{э2} = 4,695$	$f(x) = \Gamma_2 = ?$
$x_1 = 3$	$f(x_1) = 9,18$
$x_2 = 5$	$f(x_2) = 12,53$

$$\begin{aligned} \Gamma_2(Q_{э2})_{1\frac{\text{м}}{\text{с}}} &= f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) = \\ &= 9,18 + \frac{12,53 - 9,18}{5 - 3} \cdot (4,695 - 3) = 12,019 \text{ км.} \end{aligned}$$

Рассчитаем глубину зоны заражения вторичным облаком Γ_2 при скорости ветра 2 м/с для эквивалентного количества вещества по вторичному облаку $Q_{э2} = 4,695 \text{ т}$ спустя 1 ч после аварии. Данные для расчета, взятые из таблицы 1.4, сводим в таблицу 1.15.

Таблица 1.15 – Данные для расчета Γ_2 при скорости ветра 2 м/с

$x = Q_{э2} = 4,695$	$f(x) = \Gamma_2 = ?$
$x_1 = 3$	$f(x_1) = 5,35$
$x_2 = 5$	$f(x_2) = 7,20$

$$\begin{aligned}\Gamma_2(Q_{э2})_{2\frac{м}{с}} &= f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) = \\ &= 5,35 + \frac{7,20 - 5,35}{5 - 3} \cdot (4,695 - 3) = 6,918 \text{ км.}\end{aligned}$$

Далее рассчитаем глубину зоны заражения вторичным облаком Γ_2 для эквивалентного количества вещества $Q_{э2} = 4,695$ т при скорости ветра 1,8 м/с. В таблицу 1.16 сведем полученные данные для расчета.

Таблица 1.16 – Данные для расчета Γ_2 при скорости ветра 1,8 м/с

$x = v = 1,8$	$f(x) = \Gamma_2 = ?$
$x_1 = 1$	$f(x_1) = 12,019$
$x_2 = 2$	$f(x_2) = 6,918$

$$\begin{aligned}\Gamma_2(Q_{э2})_{1,8\frac{м}{с}} &= f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) = \\ &= 12,019 + \frac{6,918 - 12,019}{2 - 1} \cdot (1,8 - 1) = 7,938 \text{ км.}\end{aligned}$$

Таким образом, глубина зоны заражения вторичным облаком Γ_2 спустя 1 ч после начала аварии для эквивалентного количества вещества по вторичному облаку $Q_{э2} = 4,695$ т и скорости ветра 1,8 м/с равна 7,938 км.

Аналогичным образом определим глубину зоны заражения вторичным облаком Γ_2 спустя 2 и 4 ч после начала аварии и спустя расчетное время испарения АХОВ $T_{исп} = 66,37$ ч при скорости ветра 1,8 м/с. Полученные данные сводим в таблицу 1.17.

Таблица 1.17 – Результаты расчета глубины зоны заражения вторичным облаком Γ_2 по величине эквивалентного количество АХОВ во вторичном облаке $Q_{э2}$ спустя 1, 2 и 4 ч и для расчетного $T_{исп}$ после аварии

Время от начала аварии, ч	$T_{ав} = 1$	$T_{ав} = 2$	$T_{ав} = 4$	$T_{исп} = 66, 37$
Эквивалентное количество вещества по вторичному облаку $Q_{э2}$, т	4,695	8,174	14,232	134,649
Глубина заражения вторичным облаком $\Gamma_2(Q_{э2})$, км, при $v = 1,8$ м/с	7,938	10,956	15,280	57,713

4 Определение полной глубины зоны заражения.

Полная глубина зоны заражения (Γ_{Π} , км) на время испарения или время, прошедшее после аварии, определим по формуле

$$\Gamma_{\Pi} = \max\{\Gamma_1, \Gamma_2\} + 0,5 \min\{\Gamma_1, \Gamma_2\}. \quad (1.11)$$

Таким образом, полная глубина зоны заражения Γ_{Π} спустя 1, 2 и 4 ч и спустя $T_{\text{исп}}$ после аварии при скорости ветра 1,8 м/с составит:

- при $T_{\text{ав}} = 1$ ч, $\Gamma_{\Pi} = 38,565 + 0,5 \cdot 7,938 = 42,534$ км;
- при $T_{\text{ав}} = 2$ ч, $\Gamma_{\Pi} = 38,565 + 0,5 \cdot 10,956 = 44,043$ км;
- при $T_{\text{ав}} = 4$ ч, $\Gamma_{\Pi} = 38,565 + 0,5 \cdot 15,28 = 46,205$ км;
- при $T_{\text{исп}} = 66,37$ ч, $\Gamma_{\Pi} = 57,713 + 0,5 \cdot 38,565 = 76,996$ км.

5 Определение предельного значения глубины переноса зараженного воздуха АХОВ ($\Gamma_{\text{з.пред}}$, км).

Полученное значение полной глубины зоны заражения Γ_{Π} сравним с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс $\Gamma_{\text{з.пред}}$.

Предельное значение глубины переноса зараженного воздуха АХОВ ($\Gamma_{\text{з.пред}}$, км) определим по формуле

$$\Gamma_{\text{з.пред}} = T_{\text{ав}} \cdot v_{\Pi}, \text{ км}, \quad (1.12)$$

где $T_{\text{ав}}$ – время от начала аварии, ч;

v_{Π} – скорость переноса зараженного воздуха, км/ч (см. таблицу 1.5).

Используя формулу линейной интерполяции (1.7), рассчитаем скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха v_{Π} для заданной скорости ветра 1,8 м/с при инверсии (состояние приземного слоя воздуха по исходным данным). Данные сводим в таблицу 1.18.

Таблица 1.18 – Данные для расчета v_{Π} при скорости ветра 1,8 м/с

$x = v = 1,8$	$f(x) = v_{\Pi} = ?$
$x_1 = 1$	$f(x_1) = 5$
$x_2 = 2$	$f(x_2) = 10$

$$v_{\Pi, 1,8 \text{ м/с}} = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) = 5 + \frac{10 - 5}{2 - 1} \cdot (1,8 - 1) = 9 \text{ км/ч}.$$

Таким образом, скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха $v_{\text{п}}$ при скорости ветра $v = 1,8$ м/с равна 9 км/ч.

По формуле (1.12) определим предельное значение глубины переноса зараженного воздуха АХОВ $\Gamma_{\text{з.пред}}$ спустя 1, 2 и 4 ч и спустя $T_{\text{исп}}$ после аварии при скорости ветра 1,8 м/с:

- при $T_{\text{ав}} = 1$ ч, $\Gamma_{\text{з.пред}} = 1 \cdot 9 = 9$ км;
- при $T_{\text{ав}} = 2$ ч, $\Gamma_{\text{з.пред}} = 2 \cdot 9 = 18$ км;
- при $T_{\text{ав}} = 4$ ч, $\Gamma_{\text{з.пред}} = 4 \cdot 9 = 36$ км;
- при $T_{\text{исп}} = 66,37$ ч, $\Gamma_{\text{з.пред}} = 66,37 \cdot 9 = 597,33$ км.

6 Определение расчетного значения глубины зоны заражения АХОВ ($\Gamma_{\text{з.расч}}$, км).

За окончательную расчетную глубину зоны заражения ($\Gamma_{\text{з.расч}}$) принимается меньшее из двух сравниваемых между собой значений в зависимости от агрегатного состояния:

- для АХОВ, хранящихся в газообразном состоянии, за $\Gamma_{\text{з.расч}}$ принимается меньшее из значений Γ_1 и $\Gamma_{\text{з.пред}}$;
- для АХОВ, хранящихся в жидком состоянии, за $\Gamma_{\text{з.расч}}$ принимается меньшее из значений Γ_2 и $\Gamma_{\text{з.пред}}$;
- для сжиженных газов $\Gamma_{\text{з.расч}}$ определяется следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{если } \Gamma_{\text{п}} > \Gamma_{\text{з.пред}}, \text{ то } \Gamma_{\text{з.расч}} &= \Gamma_{\text{з.пред}}; \\ \text{если } \Gamma_{\text{п}} < \Gamma_{\text{з.пред}}, \text{ то } \Gamma_{\text{з.расч}} &= \Gamma_{\text{п}}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

В случае распространения зараженного воздуха на закрытой местности $\Gamma_{\text{з.расч}}$ уменьшается в 3 раза.

Сведем полученные расчетные значения глубины заражения АХОВ спустя 1, 2 и 4 ч и спустя $T_{\text{исп}}$ после аварии при скорости ветра 1,8 м/с в таблицу 1.19.

Таблица 1.19 – Результаты расчета глубины заражения спустя 1, 2 и 4 ч и спустя $T_{\text{исп}}$ после аварии при скорости ветра 1,8 м/с

$T_{\text{ав}}, \text{ ч}$	$\Gamma_1, \text{ км}$	$\Gamma_2, \text{ км}$	$\Gamma_{\text{п}}, \text{ км}$	$\Gamma_{\text{з.пред}}, \text{ км}$
1	38,565	7,938	42,534	9
2		10,956	44,043	18
4		15,280	46,205	36
66,37	38,565	57,713	76,996	597,33

Для АХОВ, хранящихся в виде сжиженных газов (по условию задания), определим окончательную расчетную глубину зоны заражения $\Gamma_{з.расч}$, км, из соотношений (1.13):

- при $T_{ав} = 1$ ч, $\Gamma_{п} > \Gamma_{з.пред}$, следовательно, $\Gamma_{з.расч} = \Gamma_{з.пред} = 9$ км;
- при $T_{ав} = 2$ ч, $\Gamma_{п} > \Gamma_{з.пред}$, следовательно, $\Gamma_{з.расч} = \Gamma_{з.пред} = 18$ км;
- при $T_{ав} = 4$ ч, $\Gamma_{п} > \Gamma_{з.пред}$, следовательно $\Gamma_{з.расч} = \Gamma_{з.пред} = 36$ км;
- при $T_{исп} = 66,37$ ч, $\Gamma_{п} < \Gamma_{з.пред}$, следовательно, $\Gamma_{з.расч} = \Gamma_{п} = 76,996$ км.

7 Определение площадей зоны заражения.

Определим площадь зоны возможного и фактического заражения.

Площадь зоны возможного заражения – площадь территории, в пределах которой под воздействием изменения направления ветра может перемещаться облако зараженного воздуха.

Площадь зоны фактического заражения – площадь территории, приземный слой воздуха на которой заражен парами (аэрозолем) ядовитого вещества в опасных для жизни или здоровья людей концентрациях.

Зону возможного заражения рассматривают как сектор неопределенности, внутри которого находится фактическая (реальная) зона заражения. Данный сектор характеризует территорию, на которой должны приниматься меры по обеспечению безопасности производственного персонала ХОО и населения.

Площадь зоны возможного заражения (S_v , км²) определяется по формуле

$$S_v = \frac{\pi \cdot \Gamma_{з.расч}^2}{360} \cdot \varphi, \quad (1.14)$$

где S_v – площадь зоны возможного заражения, км²;

$\Gamma_{з.расч}$ – расчетная глубина зоны заражения, км;

φ – угол сектора вероятного изменения направления ветра (град), определяемый в зависимости от скорости ветра по таблице 1.6, где $\varphi = 90^\circ$.

Площадь зоны возможного заражения S_v определим по формуле (1.14) при скорости ветра 1,8 м/с и углу сектора вероятного изменения направления ветра $\varphi = 90^\circ$ (согласно таблице 1.6):

- при $T_{ав} = 1$ ч, $S_v = \frac{3,14 \cdot 9^2}{360} \cdot 90 = 63,59$ км²;
- при $T_{ав} = 2$ ч, $S_v = \frac{3,14 \cdot 18^2}{360} \cdot 90 = 254,34$ км²;

- при $T_{ав} = 4$ ч, $S_{в} = \frac{3,14 \cdot 36^2}{360} \cdot 90 = 1017,36 \text{ км}^2$;
- при $T_{исп} = 66,37$ ч, $S_{в} = \frac{3,14 \cdot 76,996^2}{360} \cdot 90 = 4653,731 \text{ км}^2$.

Площадь зоны фактического заражения ($S_{ф}$, км²) определяется по формуле

$$S_{ф} = K_8 \cdot \Gamma_{з.расч}^2 \cdot T_{ав}^{0,2}, \quad (1.15)$$

где $S_{ф}$ – площадь зоны фактического заражения устойчивости воздуха, км²;

K_8 – коэффициент, зависящий от степени вертикальной устойчивости атмосферы ($K_8 = 0,081$ для инверсии; $K_8 = 0,133$ для изотермии; $K_8 = 0,235$ для конвекции);

$\Gamma_{з.расч}$ – расчетная глубина зоны заражения, км;

$T_{ав}$ – время, прошедшее после аварии, ч.

Определим площадь зоны фактического заражения $S_{ф}$ по формуле (1.15) для инверсии (по условию задания), где $K_8 = 0,081$:

- при $T_{ав} = 1$ ч, $S_{ф} = 0,081 \cdot 9^2 \cdot 1^{0,2} = 6,561 \text{ км}^2$;
- при $T_{ав} = 2$ ч, $S_{ф} = 0,081 \cdot 18^2 \cdot 2^{0,2} = 30,146 \text{ км}^2$;
- при $T_{ав} = 4$ ч, $S_{ф} = 0,081 \cdot 36^2 \cdot 4^{0,2} = 138,517 \text{ км}^2$.

Для определения максимальной площади зоны фактического заражения $S_{ф}$ вместо $T_{ав}$ следует подставить значение $T_{исп}$ (в любом случае при $T_{ав} > T_{исп}$ необходимо подставить значение $T_{исп}$).

Площадь зоны фактического заражения $S_{ф}$ для $T_{исп} = 66,37$ ч не определяется, так как $T_{ав} < T_{исп}$, т. е. распространение облака длится больше 4 ч, поэтому велика вероятность изменения направления ветра.

Зона фактического заражения $S_{ф}$ имеет форму эллипса, большая ось которого равна расчетной глубине зоны заражения $\Gamma_{з.расч}$, а малая ось зависит от площади фактического заражения и определяется по формуле

$$a = \frac{4S_{ф}}{\pi \cdot \Gamma_{з.расч}}, \quad (1.16)$$

где a – ширина зоны фактического заражения, км.

Определим ширину зоны фактического заражения a по формуле (1.16):

$$\begin{aligned} - \text{при } T_{\text{ав}} = 1 \text{ ч, } a &= \frac{4 \cdot 6,561}{3,14 \cdot 9} = 0,929 \text{ км;} \\ - \text{при } T_{\text{ав}} = 2 \text{ ч, } a &= \frac{4 \cdot 30,146}{3,14 \cdot 18} = 2,134 \text{ км;} \\ - \text{при } T_{\text{ав}} = 4 \text{ ч, } a &= \frac{4 \cdot 138,517}{3,14 \cdot 36} = 4,902 \text{ км.} \end{aligned}$$

8 Определение ожидаемого времени подхода зараженного воздуха к объекту экономики.

Время подхода $T_{\text{подх}}$ облака АХОВ к заданному объекту зависит от скорости переноса облака воздушным потоком и определяется по формуле

$$T_{\text{подх}} = \frac{L}{v_{\text{п}}}, \text{ ч,} \quad (1.17)$$

где L – расстояние от источника заражения до объекта экономики, км;

$v_{\text{п}}$ – скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха, км/ч,
 $v_{\text{п}1,8 \text{ м/с}} = 9 \text{ км/ч}$ (ранее рассчитанное) при скорости ветра 1,8 м/с.

Время подхода $T_{\text{подх}}$ облака АХОВ к заданному объекту составит

$$T_{\text{подх}} = \frac{L}{v_{\text{п}}} = \frac{60}{9} = 6,67 \text{ ч.}$$

9 Нанесение химической обстановки на карту (схему) с использованием полученных расчетных данных.

Зона возможного заражения ограничена сектором с углом $\varphi = 90^\circ$, так как скорость ветра по условию задания составляет 1,8 м/с (см. таблицу 1.6). Зона возможного заражения штрихуется. Зона фактического заражения имеет форму эллипса и наносится пунктиром.

10 Определение возможных потерь населения при аварии на ХОО.

Доля незащищенного населения составит (по формулам (1.5), (1.6)):

$$\begin{aligned} - \text{в городе: } K &= (1 - 0,47)(1 - 0,38) = 0,329; \\ - \text{в загородной зоне: } K' &= (1 - 0,08)(1 - 0,03) = 0,892. \end{aligned}$$

Возможные общие потери населения в очаге поражения АХОВ определяются по формуле (1.4) – Γ_r по условию 0,7 от $\Gamma_{з.расч}$; S_ϕ и $\Gamma_{з.расч}$ берется при $T_{ав} = 4$ ч:

$$N = S_\phi \left[\frac{\Gamma_r}{\Gamma_{з.расч}} \cdot \rho \cdot K + \left(1 - \frac{\Gamma_r}{\Gamma_{з.расч}} \right) \cdot \rho' \cdot K' \right] =$$

$$= 138,517 \cdot \left[\frac{0,7 \cdot 36}{36} \cdot 2800 \cdot 0,329 + \left(1 - \frac{0,7 \cdot 36}{36} \right) \cdot 189 \cdot 0,892 \right] = 96\,221 \text{ чел.}$$

Ориентировочная структура потерь людей в очаге поражения АХОВ составит:

– санитарные потери легкой формы тяжести (I степень) – 25 %:

$$96\,221 \cdot 0,25 = 24\,055 \text{ чел.};$$

– санитарные потери средней и тяжелой формы тяжести, обязательна госпитализация (II и III степени) – 40 %:

$$96\,221 \cdot 0,4 = 38\,489 \text{ чел.};$$

– безвозвратные потери, смертельный исход (IV степень) – 35 %:

$$96\,221 \cdot 0,35 = 33\,677 \text{ чел.}$$

Возможное количество пораженных людей и структура их поражения в городе:

$$N_r = S_\phi \cdot D_{г.з} \cdot \rho \cdot K = 138,517 \cdot 0,7 \cdot 2800 \cdot 0,329 = 89\,212 \text{ чел.,}$$

из них: I степени (25 %) – $89\,212 \cdot 0,25 = 22\,303$ чел.;

II и III степени (40 %) – $89\,212 \cdot 0,4 = 35\,685$ чел.;

IV степени (35 %) – $89\,212 \cdot 0,35 = 31\,224$ чел.

Возможное количество пораженных людей и структура их поражения в загородной зоне:

$$N_{33} = N - N_r = 96\,221 - 89\,212 = 7\,009 \text{ чел.},$$

из них: I степени (25 %) – $7\,009 \cdot 0,25 = 1\,752$ чел.;

II и III степени (40 %) – $7\,009 \cdot 0,4 = 2\,804$ чел.;

IV степени (35 %) – $7\,009 \cdot 0,35 = 2\,453$ чел.

Построим ситуационный план аварии, обозначим зоны заражения (рисунок 1.5).

Полученные расчетные данные оценки обстановки при аварии на ХОО представлены в таблице 1.20.

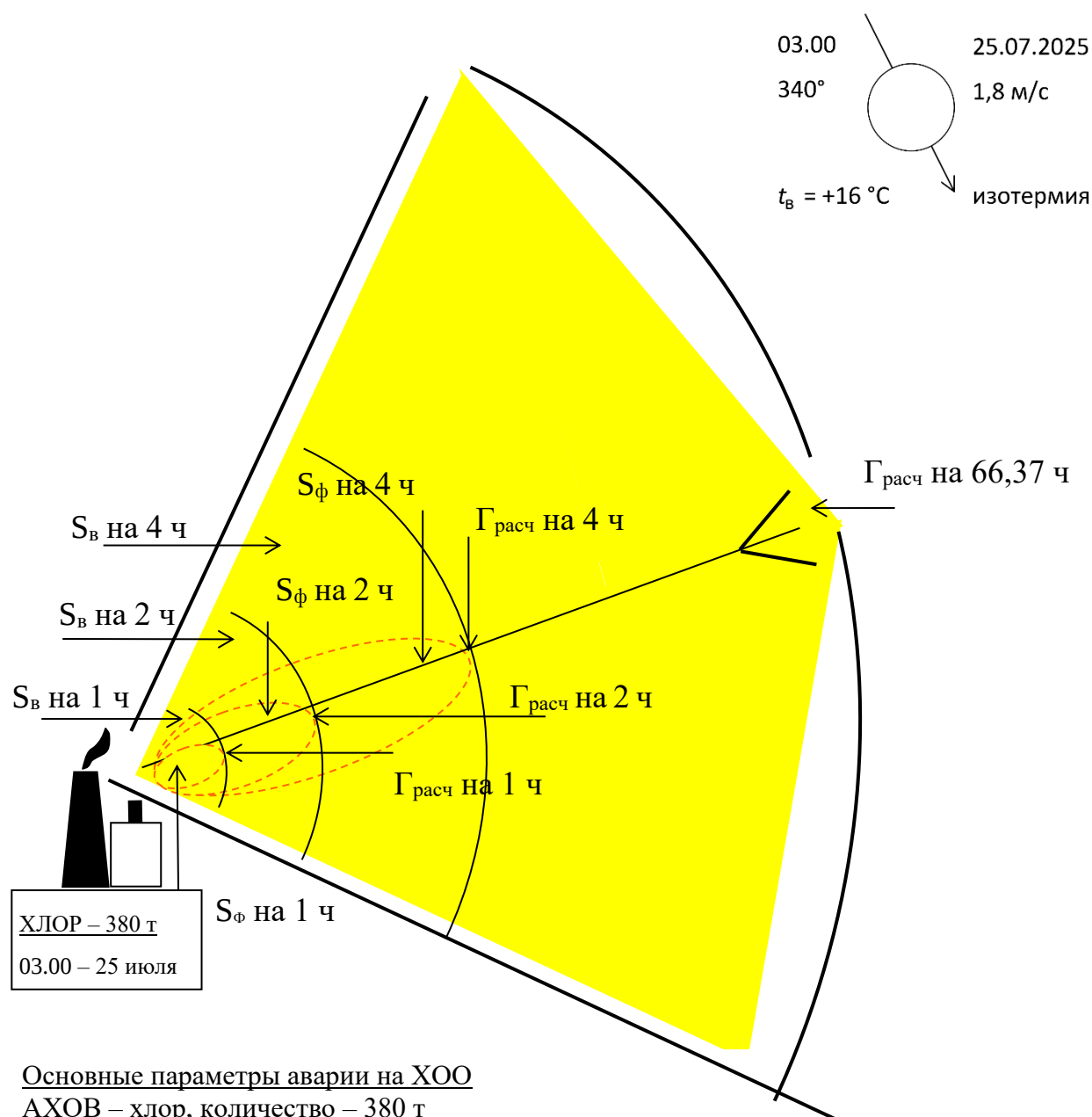
Таблица 1.20 – Прогнозируемые данные оценки обстановки при аварии на ХОО

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Продолжительность действия источника химического заражения, ч	66,37
2	Глубина заражения первичным облаком, км	38,565
3	Глубина заражения вторичным облаком спустя 1 ч после начала аварии, км	7,938
4	Глубина заражения вторичным облаком спустя 2 ч после начала аварии, км	10,956
5	Глубина заражения вторичным облаком спустя 4 ч после начала аварии, км	15,280
6	Глубина заражения вторичным облаком спустя время испарения АХОВ после начала аварии, км	57,713
7	Возможная предельная/расчетная глубина зоны заражения спустя 1 ч после начала аварии, км	9/9
8	Возможная предельная/расчетная глубина зоны заражения спустя 2 ч после начала аварии, км	18/18
9	Возможная предельная/расчетная глубина зоны заражения спустя 4 ч после начала аварии, км	36/36
10	Возможная предельная/расчетная глубина зоны заражения спустя время испарения АХОВ после начала аварии, км	597,33/ 76,996
11	Площадь зоны возможного/фактического химического заражения спустя 1 ч после начала аварии, км ²	63,59/ 6,561

Продолжение таблицы 1.20

№ п/п	Наименование параметра	Значение
12	Площадь зоны возможного/фактического химического заражения спустя 2 ч после начала аварии, км ²	254,34/ 30,146
13	Площадь зоны возможного/фактического химического заражения время испарения АХОВ, км ²	1 017,36/ 138,517
14	Площадь зоны возможного/фактического химического заражения спустя время испарения АХОВ после начала аварии, км ²	4 653,731/ –
15	Ширина зоны фактического химического заражения спустя 1 ч после начала аварии, км	0,929
16	Ширина зоны фактического химического заражения спустя 2 ч после начала аварии, км	2,134
17	Ширина зоны фактического химического заражения спустя 4 ч после начала аварии, км	4,902
18	Ожидаемое время подхода зараженного воздуха к объекту экономики, ч	6,67
19	Доля незащищенного населения в городе	0,329
20	Доля незащищенного населения в загородной зоне	0,892
21	Возможные общие потери населения в очаге поражения АХОВ, чел, включая: – санитарные потери легкой формы тяжести (I степень) – санитарные потери средней и тяжелой формы тяжести, обязательна госпитализация (II и III степени) – безвозвратные потери, смертельный исход (IV степень)	96 221 24 055 38 489 33 677
22	Возможное количество пораженных людей в городе, чел, включая: – санитарные потери легкой формы тяжести (I степень) – санитарные потери средней и тяжелой формы тяжести, обязательна госпитализация (II и III степени) – безвозвратные потери, смертельный исход (IV степень)	89 212 22 303 35 685 31 224
23	Возможное количество пораженных людей в загородной зоне, чел, включая: – санитарные потери легкой формы тяжести (I степень) – санитарные потери средней и тяжелой формы тяжести, обязательна госпитализация (II и III степени) – безвозвратные потери, смертельный исход (IV степень)	7 009 1 752 2 804 2 453

Ситуационный план аварии
на ХОО (масштаб 1 : 75000)



Основные параметры аварии на ХОО

АХОВ – хлор, количество – 380 т

t, ч	Г _{расч} , км	S _в , км ²	S _ф , км ²
1	9	63,59	6,561
2	18	254,34	30,146
4	36	1017,36	138,517

Общее число пораженных: 96 221 чел.,

из них: I степени (25 %) – 24 055 чел.,

II и III степени (40 %) – 38 489 чел.,

IV степени (35 %) – 33 677 чел.

Рисунок 1.5 – Схема зон заражения

Задача для самостоятельной работы

Оценить обстановку при аварии на химически опасном объекте и построить ситуационный план аварии. Определить продолжительность действия химического источника заражения, определить глубину и площади зон возможного и фактического химического заражения на время после аварии (1, 2 и 4 ч) и на время действия химического источника заражения, определить ожидаемое время распространения зоны заражения АХОВ до объекта экономики, определить возможное число пострадавших среди населения и их структуру.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 1.21. Дополнительные данные по АХОВ для своего варианта брать из таблицы 1.1. Состояние АХОВ по условию – жидкое.

Содержание отчета

- 1 Титульный лист.
- 2 Исходные данные в соответствии с вариантом.
- 3 Ход выполнения работы.
- 4 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какой объект называют химически опасным?
- 2 Что такое химическая безопасность?
- 3 Что такое зона химического заражения?
- 4 Что такое первичное облако?
- 5 Что такое вторичное облако?
- 6 Какие типы вертикальной устойчивости атмосферы различают?
- 7 Что такое очаг химического поражения?
- 8 Что такое инверсия, изотермия, конвекция?
- 9 Какие выделяют особенности очагов химического поражения АХОВ?
- 10 В чем суть прогнозирования химической обстановки?

Таблица 1.21 – Исходные данные

Вариант	Наименование АХОВ (см. таблицу 1.1)	Q_o , т	v , м/с	t_b , °С	H , м	$D_{г.з}$, доля	L , км	СВУ	ρ , чел./ км ²	ρ' , чел./ км ²	n_1 , %	n'_1 , %	n_2 , %	n'_2 , %
1	Акролеин	320	1,5	5	3	0,7	90	из	3000	208	47	9	39	4
2	Аммиак: изотермическое хранение	400	4,4	23	3	0,6	80	из	2800	192	46	8	38	3
3	Ацетонитрил	340	6	20	3	0,8	70	из	2600	185	45	7	37	2
4	Ацетонциан-гидрид	380	1,4	14	3	0,7	60	из	3000	208	47	9	39	4
5	Водород мышьяковистый	360	3,6	18	3	0,6	90	к	2800	192	46	8	38	3
6	Водород фтористый	320	3,7	24	3	0,8	80	ин	2600	185	45	7	37	2
7	Водород хлористый	400	2,1	12	3	0,7	70	из	3000	208	47	9	39	4
8	Водород бромистый	340	2,6	23	3	0,6	60	к	2800	192	46	8	38	3
9	Водород цианистый	380	2,7	28	3	0,8	90	ин	2600	185	45	7	37	2
10	Диметиламин	360	1,3	30	3	0,7	80	из	3000	208	47	9	39	4
11	Метиламин	320	4,6	–3	3	0,6	70	к	2800	192	46	8	38	3
12	Метил бромистый	400	4,3	–5	3	0,8	60	ин	2600	185	45	7	37	2
13	Метил хлористый	340	4,2	5	3	0,7	90	из	3000	208	47	9	39	4
14	Метилакрилат	380	1,2	–7	3	0,6	80	к	2800	192	46	8	38	3
15	Метилмеркаптан	360	1,4	9	3	0,8	70	ин	2600	185	45	7	37	2
16	Нитрил акриловой кислоты	320	1,6	–12	3	0,7	60	из	3000	208	47	9	39	4
17	Окислы азота	400	1,9	–14	3	0,6	90	к	2800	192	46	8	38	3

4 Продолжение таблицы 1.21

Вариант	Наименование АХОВ (см. таблицу 1.1)	Q_0 , т	v , м/с	t_B , °C	H , м	$D_{г.з}$, доля	L , км	СВУ	ρ , чел./ км ²	ρ' , чел./ км ²	n_1 , %	n'_1 , %	n_2 , %	n'_2 , %
18	Окись этилена	340	2,3	19	3	0,8	80	ин	2600	185	45	7	37	2
19	Сернистый ангидрид	380	2,5	22	3	0,7	70	из	3000	208	47	9	39	4
20	Сероводород	360	2,7	2	3	0,6	60	к	2800	192	46	8	38	3
21	Сероуглерод	320	2,9	6	3	0,8	90	ин	2600	185	45	7	37	2
22	Соляная кислота (концентрированная)	400	3,3	8	3	0,7	80	из	3000	208	47	9	39	4
23	Триметиламин	340	3,4	17	3	0,6	70	к	2800	192	46	8	38	3
24	Формальдегид	380	3,6	−13	3	0,8	60	ин	2600	185	45	7	37	2
25	Фосген	360	3,8	−6	3	0,7	90	из	3000	208	47	9	39	4
26	Фтор	320	4,1	8	3	0,6	80	к	2800	192	46	8	38	3
27	Фосфор трихлористый	400	4,3	9	3	0,8	70	ин	2600	185	45	7	37	2
28	Хлорциан	340	4,8	−7	3	0,7	60	из	3000	208	47	9	39	4
29	Хлорпикрин	380	4,2	−2	3	0,6	90	к	2800	192	46	8	38	3
30	Этиленимин	360	3,8	16	3	0,8	80	ин	2600	185	45	7	37	2

Список использованных источников

1 СН 2.02.04-2020 Строительные нормы Республики Беларусь. Инженерно-технические мероприятия гражданской обороны. – Введ. 2020–11–12. – Минск : Стройтехнорм, 2021. – 26 с.

2 РД 52.04.253–90 Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. – Введ. 1990–07–01. – СПб. : Госкомгидромета СССР, 2000. – 25 с.

3 ГОСТ 22.0.05–97 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Техногенные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. – Введ. 1996–01–01. – Минск : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2018. – 16 с.

4 СП 2.02.03-2024 Приспособление объектов коммунально-бытового назначения для санитарной обработки людей, специальной обработки одежды и подвижного состава автотранспорта. – Введ. 2024–09–16. – Минск : Стройтехнорм, 2024. – 51 с.

5 СТБ 1518-2004 Безопасность в чрезвычайных ситуациях правила оформления карты обстановки по чрезвычайным ситуациям мирного и военного времени условные обозначения и сокращения. – Введ. 2005–07–01. – Минск : БелГИСС, 2004. – 36 с.

6 Щербина, Н. В. Основы промышленной безопасности : учеб.-метод. пособие / Н. В. Щербина, В. С. Осипович, К. Д. Яшин. – Минск : БГУИР, 2016. – 95 с.

Тема 2. Взрывопожаробезопасность на производстве

Цель: формирование у студентов знаний и навыков в области определения категорий помещений и зданий по взрывопожароопасной и пожарной опасности; выполнение технических расчетов для определения массы паров легковоспламеняющихся (ЛВЖ) и горючих жидкостей (ГЖ), которые могут образовывать взрывоопасные паровоздушные смеси; расчет зон, ограниченных нижним концентрационным пределом распространения пламени (НКПРП) газов и паров, при аварийном поступлении горючих газов (ГГ) и легковоспламеняющихся жидкостей в открытое пространство при неподвижной воздушной среде.

План занятия:

- 1 Изучить теорию.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.
- 4 Оформить отчет.

Теоретические сведения

Категория взрывопожарной и пожарной опасности объекта – классификационная характеристика пожарной (взрывопожарной) опасности помещения, здания, пожарного отсека, наружной установки, определяемая в зависимости от количества и пожаровзрывоопасных свойств находящихся или обращающихся в них веществ и материалов с учетом особенностей технологических процессов.

Взрыв паровоздушного облака – процесс сгорания горючей паровоздушной смеси в открытом пространстве с образованием волн давления.

Взрыв паровоздушной смеси в ограниченном объеме (резервуаре или производственном помещении) – процесс сгорания образовавшейся в ограниченном объеме горючей паровоздушной смеси с повышением давления в этом объеме.

Взрыв резервуара с перегретой жидкостью при воздействии на него очага пожара – процесс разрушения резервуара при нагреве от очага пожара находящейся в резервуаре жидкости до температуры, превышающей нормальную температуру кипения, с дальнейшим взрывообразным вскипанием жидкости. Процесс сопровождается образованием волн давления и, если жидкость горючая, огненным шаром.

Взрывоопасная смесь – смесь воздуха или окислителя с ГГ, парами ЛВЖ, горючими пылями или волокнами, которая при определенной концентрации и возникновении источника инициирования взрыва способна взорваться.

Огненный шар – крупномасштабное диффузионное пламя сгорающей массы топлива или парового облака, поднимающееся над поверхностью земли.

Пожарная нагрузка помещения (здания, сооружения) – вещества, материалы, оборудование и конструкции, имеющиеся в данном помещении (здании, сооружении), которые при пожаре могут гореть (по СТБ 11.0.03). Переменная (временная) пожарная нагрузка включает вещества и материалы, обращающиеся в производствах, технологическое и санитарно-техническое оборудование, изоляцию, вещества, находящиеся в расходных складах, мебель и другие материалы, способные гореть.

Размер зоны – протяженность ограниченной каким-либо образом части пространства.

Расчетная пожарная нагрузка – расчетный показатель, характеризующий количество теплоты, выделяющейся с единицы площади при пожаре (по СТБ 11.0.03).

Сценарий аварии – модель последовательности событий с определенной зоной воздействия опасных факторов пожара на людей, здания, сооружения и технологическое оборудование.

Категория взрывопожарной и пожарной опасности – показатель взрывопожарной и пожарной опасности помещения, здания, сооружения пожарного отсека. Категорирование помещений, зданий и наружных установок осуществляется в целях определения мер по обеспечению их взрывопожарной и пожарной безопасности.

В зависимости от количества и пожаровзрывоопасных свойств обращающихся (находящихся) веществ и материалов, с учетом особенностей технологических процессов намечаются мероприятия по обеспечению взрывопожарной и пожарной безопасности людей.

По взрывопожарной и пожарной опасности:

- *помещения* подразделяются на категории А, Б, В1–В4, Г1, Г2, Д;
- *здания* подразделяются на категории А, Б, В, Г и Д;
- *наружные установки* подразделяются на категории А_н, Б_н, В_н, Г_н, Д_н.

На рисунке 2.1 показан пример знака категоричности помещения.

ТКП 474-2013 «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» устанавливает методику определения категорий помещений и зданий (ТКП 474-2013 не распространяется

на помещения, здания и наружные установки для производства и хранения взрывчатых веществ).



Рисунок 2.1 – Знак категорийности помещения: в верхней части указывается категория помещения взрывопожарной и пожарной опасности (ТКП 474-2013), в нижней части – класс зоны (ПУЭ, 7-е издание)

Категории взрывопожарной и пожарной опасности помещений и зданий принимают в соответствии с таблицей 2.1.

Таблица 2.1 – Категории помещений

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
А (взрывопожароопасная)	ГГ, ЛВЖ с температурой вспышки не более 28 °С в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные парогазовоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа. Вещества и материалы, способные взрываться и гореть при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом в таком количестве, что расчетное избыточное давление взрыва в помещении превышает 5 кПа
Б (взрывопожароопасная)	Горючие пыли или волокна, ЛВЖ с температурой вспышки более 28 °С, ГЖ в таком количестве, что могут образовывать взрывоопасные пыле- или паровоздушные смеси, при воспламенении которых развивается расчетное избыточное давление взрыва в помещении, превышающее 5 кПа
В1–В4 (пожароопасные)	ГГ, ЛВЖ, ГЖ и трудногорючие жидкости, твердые горючие и трудногорючие вещества и материалы (в том числе пыли и волокна), вещества и материалы, способные при взаимодействии с водой, кислородом воздуха или друг с другом взрываться и гореть, при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии или обращаются, не относятся к категориям А или Б
Г1	ГГ, ЛВЖ, ГЖ, твердые горючие вещества и материалы, используемые в качестве топлива
Г2	Негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени

Продолжение таблицы 2.1

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
Д	Негорючие вещества и материалы в холодном состоянии, горючие вещества и материалы в таком количестве, что удельная пожарная нагрузка на участке их размещения в помещении не превышает 100 МДж/м ² , а пожарная нагрузка в пределах помещения – 1000 МДж

Примечания (выборка из ТКП 474-2013)

1 Разделение помещений на категории В1–В4 осуществляется согласно таблице 2.2.

2 К категории В4 допускается относить помещения (без проведения соответствующего расчета), в которых находятся:

– ГЖ и ТГЖ с температурой вспышки 120 °С и выше в системах смазки, охлаждения и гидропривода оборудования массой менее 60 кг на единицу оборудования при давлении в системе менее 0,2 МПа, при этом расстояние между оборудованием не нормируется;

– трудногорючие вещества и материалы, строительные материалы группы горючести Г1 в качестве временной пожарной нагрузки. Масса трудногорючих веществ и материалов, строительных материалов группы горючести Г1 не ограничивается при условии отсутствия в помещении иных горючих веществ и материалов. При наличии в помещении горючих веществ и материалов расчет производится с учетом полной массы трудногорючих веществ и материалов, строительных материалов группы горючести Г1;

– ГГ (при условии, что помещения, в которых они имеются в наличии, согласно расчету, не относятся к категории А и отсутствует иная пожарная нагрузка);

– негорючие грузы в горючей упаковке (для помещений класса функциональной пожарной опасности Ф 5.2), при этом: средства пакетирования (поддоны, подкладной лист и др.) по ГОСТ 21391 не относятся к горючей упаковке и при наличии в их составе горючих веществ и материалов учитываются в качестве временной пожарной нагрузки; горючая упаковка, масса которой превышает 20 % массы негорючих грузов, учитывается в качестве временной пожарной нагрузки; горючая подстилка на полу в помещениях для содержания животных, птиц и зверей в животноводческих, птицеводческих и звероводческих зданиях, при условии, что величина удельной временной пожарной нагрузки не превышает 100 МДж/м² (независимо от общей пожарной нагрузки в помещении); при отсутствии справочных или паспортных данных о негорючести растворов, содержащих ЛВЖ и ГЖ, их негорючесть должна быть подтверждена результатами испытаний.

3 К категории Д допускается относить помещения (без проведения соответствующего расчета), в которых находятся: предметы мебели на рабочих местах; помещения с мокрыми процессами (холодильники и холодильные камеры с негорючим хладагентом), при этом температура в холодильных камерах не должна превышать 0 °С.

Определение категорий В1–В4 помещения осуществляется путем сравнения максимального значения удельной пожарной нагрузки на любом из участков с величиной удельной пожарной нагрузки (таблица 2.2).

При пожарной нагрузке, включающей в себя различные сочетания (смесь) горючих и трудногорючих веществ и материалов в пределах пожароопасного участка, пожарная нагрузка Q (МДж) определяется из соотношения

$$Q = \sum_{i=1}^n G_i \cdot Q_{HI}^P, \text{ МДж}, \quad (2.1)$$

где G_i – количество i -го материала пожарной нагрузки, кг;

Q_{HI}^P – низшая теплота сгорания i -го материала пожарной нагрузки, МДж/м².

Таблица 2.2 – Пожароопасные категории помещений

Категория помещения	Удельная пожарная нагрузка g на участке, МДж/м ²	Способ размещения
B1	Более 2200	Не нормируется
B2	1400–2200	При количестве пожарной нагрузки Q , определенной по формуле 2.1, выполняется неравенство $Q \geq 0,64 \cdot g \cdot H^2$, где g : принимается равным 2200 МДж/м ² , если расчетная удельная пожарная нагрузка g (по формуле (2.2)) получается равной 1400 МДж/м ² $< g \leq 2200$ МДж/м ² ; принимается равным 1400 МДж/м ² , если расчетная удельная пожарная нагрузка g получается равной 200 МДж/м ² $< g \leq 1400$ МДж/м ² ; H – минимальное расстояние от поверхности пожарной нагрузки до нижнего пояса ферм перекрытия (покрытия), м
B3	200–1400	
B4	100–200	На любом участке пола помещения площадью не более 10 м ²

Удельная временная пожарная нагрузка g (МДж/м²) определяется из соотношения

$$g = \frac{Q}{S}, \text{ МДж/м}^2, \quad (2.2)$$

где S – площадь размещения пожарной нагрузки, м², определяется как ее линейная проекция на пол в пределах пожарного участка (не менее 10 м² и не более площади помещения). Несколько участков с пожарной нагрузкой, расположенных на расстоянии не более 1 м друг от друга, следует рассматривать как один участок.

Определение категории помещений и зданий по взрывопожароопасной (пожарной) опасности. Структура расчета категории помещения с ГГ, ЛВЖ и ГЖ:

1 Исходные данные.

2 Обоснование расчетного варианта, наиболее неблагоприятного в отношении взрыва периода.

3 Расчет массы ГГ, ЛВЖ и ГЖ, которые могут образовывать взрывоопасные газо- и паровоздушные смеси в помещении.

4 Определение коэффициента участия горючего во взрыве Z .

5 Расчет избыточного давления взрыва ΔP в помещении.

6 Вывод о категории помещения по взрывопожарной и пожарной опасности согласно техническому кодексу.

Для различных ЛВЖ показатели взрывопожарной и пожарной опасности выбираются по наиболее опасному в отношении последствий взрыва веществу.

Количество поступивших в помещение веществ, которые могут образовать взрывоопасные газовоздушные или паровоздушные смеси, определяется исходя из следующих предпосылок:

- все содержимое емкости поступает в помещение;
- происходит испарение с поверхности разлившейся жидкости, площадь испарения которой при разливе на горизонтальную поверхность определяется (при отсутствии справочных данных) исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих 70 % и менее (по массе) растворителей, разливается на площади 0,5 м², а остальных жидкостей – на 1 м² пола помещения;
- длительность испарения жидкости принимается равной времени ее полного испарения, но не более 3600 с;
- свободный объем помещения определяется как разность между геометрическим объемом помещения и объемом оборудования или предметов, находящихся внутри. Если свободный объем помещения определить невозможно, то его допускается принимать условно равным 80 % геометрического объема помещения.

Для отнесения помещения к взрывопожароопасной категории должны быть выполнены два условия: 1) свойства веществ должны соответствовать требованиям, приведенным в таблице 2.1; 2) масса веществ, участвующих в аварийной ситуации, должна быть достаточной для создания избыточного давления взрыва свыше 5 кПа.

Избыточное давление взрыва ΔP для индивидуальных горючих веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N, Cl, Br, I, F, определяется по формуле

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \cdot \frac{m \cdot Z}{V_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{Г,П}}} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{k_{\text{н}}}, \text{ кПа}, \quad (2.3)$$

где $P_{\max}$ – максимальное давление взрыва стехиометрической газо- и паровоздушной смеси в замкнутом объеме, определяемое экспериментально или по справочным данным; при отсутствии данных допускается принимать $P_{\max} = 900$ кПа;

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

m – масса ГГ или паров ЛВЖ и ГЖ, вышедших в результате расчетной аварии в помещении, кг;

Z – коэффициент участия горючего во взрыве (см. таблицу 2.7 на с. 67);

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

$k_{\text{н}}$ – коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения. Допускается принимать $k_{\text{н}}$ равным 3;

$\rho_{\text{г,п}}$ – плотность газа или пара при расчетной температуре $t_{\text{р}}$, вычисляется по формуле

$$\rho_{\text{г,п}} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_{\text{р}})}, \text{ кг/м}^3, \quad (2.4)$$

где M – молярная масса, кг·кмоль⁻¹ (см. таблицу 2.8 на с. 68);

V_0 – молярный объем, равный 22,413 м³·кмоль⁻¹;

$t_{\text{р}}$ – расчетная температура, °С. В качестве расчетной температуры следует принимать максимально возможную температуру воздуха в данном помещении в соответствующей климатической зоне или максимально возможную температуру воздуха по технологическому регламенту с учетом возможного изменения температуры в аварийной ситуации. Если не удастся определить, допускается принимать $t_{\text{р}}$ равной 61 °С.

Стехиометрическая концентрация ГГ или паров ЛВЖ и ГЖ, вычисляется по формуле

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot \beta}, \% (\text{об.}), \quad (2.5)$$

где β – стехиометрический коэффициент кислорода в реакции сгорания, который вычисляется по формуле

$$\beta = n_{\text{с}} + \frac{n_{\text{н}} - n_{\text{х}}}{4} - \frac{n_{\text{о}}}{2}, \quad (2.6)$$

где $n_{\text{с}}$, $n_{\text{н}}$, $n_{\text{о}}$, $n_{\text{х}}$ – число атомов С, Н, О и галоидов (N, Cl, Br, I, F) в молекуле горючего вещества (см. таблицу 2.8 на с. 68).

Расчет ΔP для других веществ можно посмотреть в ТКП 474-2013.

Определение массы паров ЛВЖ и ГЖ, которые могут образовывать взрывоопасные паровоздушные смеси. Масса паров жидкости m , поступивших в помещение при наличии нескольких источников испарения (поверхность разлитой жидкости, поверхность со свеженанесенным составом, открытые емкости и т. п.), определяется из выражения

$$m = m_p + m_{\text{емк}} + m_{\text{св.окр}}, \text{ кг}, \quad (2.7)$$

где m_p – масса жидкости, испарившейся с поверхности разлива, кг;

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

$m_{\text{св.окр}}$ – масса жидкости, испарившейся с поверхностей, на которые нанесен применяемый состав, кг.

При этом каждое из слагаемых в выражении (2.7) определяется по формуле

$$m = W \cdot F_{\text{и}} \cdot T, \text{ кг}, \quad (2.8)$$

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

$F_{\text{и}}$ – площадь испарения, м^2 (определяется исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов ЛВЖ и ГЖ разливается на 1 м^2 пола помещения);

T – время испарения (полное испарение жидкости, но не более 3600 с), с.

Интенсивность испарения W определяется по формуле

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_{\text{н}}, \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2), \quad (2.9)$$

где η – коэффициент, принимаемый по таблице 2.9 (см. с. 69) в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения. Температуру воздушного потока над поверхностью испарения принимаем равной 35 °С;

M – молярная масса горючего, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ (см. таблицу 2.8 на с. 68);

$P_{\text{н}}$ – давление насыщенного пара при расчетной температуре жидкости (кПа), определяется по формуле

$$P_{\text{н}} = 10^{A - \frac{B}{C_A + t_{\text{ж}}}}, \text{ кПа}, \quad (2.10)$$

где A , B , C_A – константы уравнения Антуана (см. таблицу 2.8 на с. 68);

$t_{\text{ж}}$ – температура жидкости, °С.

Определение безопасных условий использования баллонов с горючим газом.

Взрывы сосудов, работающих под давлением, относятся к физическим взрывам. Это процессы, приводящие к возникновению внутреннего давления, которое превышает предельно допустимые значения для оборудования.

Причины, вызывающие взрывы:

- снижение прочности стенок сосуда;
- заполнение емкости сосуда сверх нормы;
- дефекты, допущенные при монтаже, ремонте сосуда;
- конструктивные недостатки сосуда;
- коррозия стенок сосуда, т. е. разрушение материала, вещества вследствие физико-химического воздействия на них других веществ, находящихся в сосудах или внешней среде;
- эрозия материала сосуда, т. е. разрушение материала стенок вследствие механического воздействия находящихся в сосудах веществ и материалов или вследствие электрических разрядов.

При таких взрывах возникающее внутреннее давление в сосудах превышает предельно допустимое значение. Это приводит к разгерметизации сосуда с последующим взрывом. В случае если хранящееся в сосудах вещество нагрето до температур, превышающих предельно допустимые значения, происходит химическое превращение этого вещества, которое приводит к росту внутреннего давления.

BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) – взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости. Сущность этого явления заключается в следующем: при наличии источника воспламенения происходит перегрев горючей жидкости или сжиженного горючего газа. Резкое падение давления в сосудах вызывает вскипание находящейся в нем жидкости и образование воздушной ударной волны. Ударная волна вызывает разрушения оборудования, выброс газо- и/или паровоздушного облака.

Причины, вызывающие явление BLEVE:

- емкости под давлением, наполненные легкокипящей жидкостью (чаще всего – сжиженным горючим газом), подвергаются внешнему нагреву;
- в процессе нагрева отмечается рост внутреннего давления.

BLEVE – термин, который используется для описания целой совокупности явлений, сопровождающих внезапное разрушение сосуда (баллона, резервуара) с перегретой горючей жидкостью или со сжиженным горючим газом при наличии источника воспламенения. Например, причиной аварий на объектах сжиженных углеводородных элементов является образование огненных шаров и взрывные явления типа BLEVE.

Для образования BLEVE необходимы следующие условия:

- жидкость, хранящаяся в герметичном сосудах под давлением, к моменту вскипания (за счет сброса давления) должна быть термодинамической

перегретой, т. е. выше некоторого характерного предела относительно состояния насыщения при атмосферном давлении;

- в результате аварийной разгерметизации или разрушения корпуса сосуда должно произойти резкое падение давления над поверхностью раздела жидкой и паровой фаз.

Нарушение целостности сосуда может происходить:

- из-за переполнения сосуда сжиженными углеводородными элементами с последующим его нагревом;

- внешних механических воздействий осколков от разрушения других сосудов, переворачивания и пробоя цистерн во время транспортирования и т. п.;

- внешних тепловых воздействий, таких как локальный перегрев корпуса и связанное с этим резкое снижение его механической прочности.

В тех случаях, когда при сбросе давления не достигается граница перегрева, мгновенного вскипания жидкости в объеме не происходит. За счет возникшей неравновесности, т. е. временного термодинамического перегрева, происходит превращение части внутренней энергии в теплоту, которая далее реализуется испарением части жидкости (по обычному механизму поверхностного кипения на центрах парообразования). Это приводит к равномерному понижению температуры по всей массе жидкости.

При «провале» за границу предельного перегрева произойдет паровой взрыв, давление в сосуде может возрасти в сотни раз, вследствие чего сосуд будет разорван. За счет резкого сброса давления часть жидкости превратится в пар, а оставшаяся часть уже «переохлажденной» жидкости будет практически полностью захвачена резко расширяющимся паром и вынесена с ним в окружающее пространство в виде аэрозоля. В результате образуется аэрозольное облако расширяющихся паров, которое с большой вероятностью воспламенится за счет взаимодействия разрушающихся частей сосуда друг с другом, соударения, трения и будет сгорать с высокой интенсивностью и мощным излучением тепла в окружающее пространство.

За счет исходного эффекта расширения при разрушении сосуда высокого давления, а также за счет расширения продуктов сгорания образуется ударная волна, способная вызвать разрушения в прилегающей к сосуду зоне.

Дополнительным фактором опасности при возникновении эффекта BLEVE являются осколки от разорвавшегося корпуса, увеличивающие зону потенциальной угрозы вокруг резервуаров для хранения сжиженных газов при температуре окружающей среды.

При быстром сгорании облака, как уже отмечалось, происходит мощное излучение теплоты в окружающее пространство, способное вызвать возгорание

горючих материалов и термическое поражение людей на значительных расстояниях от места аварии.

Стадии образования расширяющихся паров вскипающей горючей жидкости:

- действие пламени на сосуд, находящийся под давлением;
- рост давления в сосуде;
- перегрев и потеря прочности стенок, не смоченных жидкостью, и, как следствие, их разрушение под действием внутреннего давления с образованием волны давления в окружающей среде;
- выброс с одновременным диспергированием жидкости в окружающее пространство из сосуда и мгновенное ее испарение с образованием парового облака;
- воспламенение этого облака с образованием волн давления и огненного шара.

Огненный шар – крупномасштабное диффузное пламя сгорающей массы горючего или парового облака, поднимающегося над поверхностью земли. Распространяется в среде со значительной скоростью.

Нижний (верхний) концентрационный предел распространения пламени (НКПРП и ВКПРП) – минимальная (максимальная) концентрация горючего вещества (газа, паров горючей жидкости) в однородной смеси с окислителем (воздух, кислород и др.), при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания (открытое внешнее пламя, искровой разряд).

Зная размер зоны, ограниченной НКПРП газов и паров, можно разработать мероприятия по предупреждению пожаров и взрывов.

Метод расчета зон, ограниченных НКПРП газов и паров, при аварийном поступлении ГГ и ЛВЖ в открытое пространство при неподвижной воздушной среде (ГОСТ Р 12.3.047–98). Расстояния $X_{\text{НКПРП}}$, $Y_{\text{НКПРП}}$ и $Z_{\text{НКПРП}}$ (м) для ГГ и ЛВЖ, ограничивающие область концентраций, превышающих НКПРП, рассчитывают по следующим формулам:

– для ГГ:

$$X_{\text{НКПРП}} = Y_{\text{НКПРП}} = 14,6 \left(\frac{m_{\text{Г}}}{\rho_{\text{Г}} C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,33}, \text{ м}; \quad (2.11)$$

$$Z_{\text{НКПРП}} = 0,33 \left(\frac{m_{\text{Г}}}{\rho_{\text{Г}} C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,33}, \text{ м}; \quad (2.12)$$

– для паров ЛВЖ:

$$X_{\text{НКПРП}} = Y_{\text{НКПРП}} = 3,2\sqrt{K} \left(\frac{p_{\text{н}}}{C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} p_{\text{н}}} \right)^{0,33}, \text{ м}; \quad (2.13)$$

$$Z_{\text{НКПРП}} = 0,12\sqrt{K} \left(\frac{p_{\text{н}}}{C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} p_{\text{н}}} \right)^{0,33}, \text{ м}, \quad (2.14)$$

где $m_{\text{Г}}$ – масса поступившего в открытое пространство ГГ при аварийной ситуации, кг;

$\rho_{\text{Г}}$ – плотность ГГ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м³, рассчитывается по формуле (2.4);

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

$\rho_{\text{п}}$ – плотность паров ЛВЖ при расчетной температуре и атмосферном давлении, кг/м³, рассчитывается по формуле (2.4);

$p_{\text{н}}$ – давление насыщенных паров ЛВЖ при расчетной температуре, кПа;

K – коэффициент (для ЛВЖ $K = T / 3600$, где T – продолжительность поступления паров ЛВЖ в открытое пространство, с);

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

Размер зоны, ограниченной НКПРП газов и паров, представляет собой зону радиусом R_3 , м, и высотой Z_3 , м, которые вычисляют, исходя из значений $X_{\text{НКПРП}}$, $Y_{\text{НКПРП}}$ и $Z_{\text{НКПРП}}$.

Для ГГ $R_3 > X_{\text{НКПРП}}$, $R_3 > Y_{\text{НКПРП}}$ и $Z_3 > h_{\text{ист}} + R_3$ ($h_{\text{ист}}$ – высота источника поступления ГГ от уровня земли, м). Для ЛВЖ $R_3 > X_{\text{НКПРП}}$, $R_3 > Y_{\text{НКПРП}}$ и $Z_3 > Z_{\text{НКПРП}}$.

Для ГГ геометрически зона, ограниченная НКПРП газов, будет представлять цилиндр с основанием радиусом R_3 и высотой $h_3 = 2R_3$ при $R_3 \leq h_{\text{ист}}$ и $h_3 = h_{\text{ист}} + R_3$ при $R_3 > h_{\text{ист}}$, внутри которого расположен источник возможного выделения ГГ.

Для ЛВЖ геометрически зона, ограниченная НКПРП паров, будет представлять цилиндр с основанием радиусом R_3 и высотой $h_3 = Z_{\text{НКПРП}}$ при высоте источника паров ЛВЖ $h_{\text{ист}} < Z_{\text{НКПРП}}$ и $h_3 = h_{\text{ист}} + Z_{\text{НКПРП}}$ при $h_{\text{ист}} \geq Z_{\text{НКПРП}}$.

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

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

Пример решения задач

Задача 2.1. Определить категорию взрывопожарной и пожарной опасности помещения. Помещение складирования следующего размера: длина – 16 м, ширина – 8 м, высота – 6 м. Площадь помещения составляет 128 м^2 . Объем помещения составляет 768 м^3 . В помещении хранится изопропиловый спирт в емкости объемом 300 л. Молярная масса изопропилового спирта равна $60,09 \text{ кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$. Константы уравнения Антуана: $A = 7,51055$; $B = 1733,00$; $C_A = 232,380$. Химическая формула изопропилового спирта $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$. Температура вспышки изопропилового спирта $t_{\text{всп}} = +14^\circ\text{C}$. Скорость воздуха в производственном помещении $0,7 \text{ м/с}$. Район – г. Минск, температура воздуха 35°C . За аварийную ситуацию принимается разлив технологической жидкости в результате перфорации емкости. Испарение с обработанных деталей не учитывается.

Решение

Аварийная ситуация состоит в том, что разлившийся изопропиловый спирт растекается по полу помещения, происходит его испарение, в результате этого в помещении образуется паровоздушная смесь, воспламенение которой может привести к взрыву.

Плотность пара при расчетной температуре (г. Минск, $t_p = 35^\circ\text{C}$) рассчитывается по формуле (2.4):

$$\rho_{\text{г,п}} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_p)} = \frac{60,09}{22,413 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 35)} = 2,376 \text{ кг/м}^3.$$

Давление насыщенных паров изопропилового спирта при расчетной температуре с применением констант Антуана – по формуле (2.10):

$$P_{\text{н}} = 10^{A - \frac{B}{C_A + t_{\text{ж}}}} = 10^{7,51055 - \frac{1733,00}{232,380 + 35}} = 10,694 \text{ кПа}.$$

Интенсивность испарения – по формуле (2.9):

$$W = 10^{-6} \cdot \eta \cdot \sqrt{M} \cdot P_{\text{н}} = 10^{-6} \cdot 3,8 \cdot \sqrt{60,09} \cdot 10,694 = 3,150 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(с} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

Определим площадь разлива технологической жидкости, исходя из расчета, что 1 л смеси и растворов ЛВЖ, ГЖ разливается на 1 м^2 . Площадь разлива технологической жидкости в результате перфорации емкости составит $F_{\text{и}} = 300 \text{ м}^2$. Поскольку площадь помещения равна 128 м^2 и меньше

рассчитываемой площади разлива изопропилового спирта, то окончательно принимаем площадь разлива равной площади помещения 128 м^2 .

Масса паров изопропилового спирта, поступивших в помещение, рассчитывается по формуле (2.8):

$$m_p = W \cdot F_{\text{н}} \cdot T = 3,150 \cdot 10^{-4} \cdot 128 \cdot 3600 = 1,452 \cdot 10^2 \text{ кг.}$$

Коэффициент участия горючего во взрыве по таблице 2.7 (см. с. 67) равен $Z = 0,3$.

Находим стехиометрический коэффициент кислорода $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ в реакции сгорания – по формуле (2.6):

$$\beta = 3 + \frac{8 - 0}{4} - \frac{1}{2} = 4,5.$$

Значение стехиометрической концентрации паров $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ вычисляем по формуле (2.5):

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 4,5} = 4,39 \% (\text{об.}).$$

Свободный объем помещения определяется как разность между геометрическим объемом помещения и объемом оборудования или предметов, находящихся внутри. Если свободный объем помещения определить невозможно, то его допускается принимать условно равным 80 % геометрического объема помещения. Следовательно, свободный объем помещения равен

$$V_{\text{св}} = 0,8 \cdot V_{\text{пом}} = 0,8 \cdot (16 \cdot 8 \cdot 6) = 614,4 \text{ м}^3.$$

Выполним расчет избыточного давления взрыва ΔP в помещении по формуле (2.3):

$$\begin{aligned} \Delta P &= (P_{\text{max}} - P_0) \cdot \frac{m \cdot Z}{V_{\text{св}} \cdot \rho_{\text{г,л}}} \cdot \frac{100}{C_{\text{ст}}} \cdot \frac{1}{k_{\text{н}}} = \\ &= (900 - 101) \cdot \frac{1,452 \cdot 10^2 \cdot 0,3}{614,4 \cdot 2,376} \cdot \frac{100}{4,39} \cdot \frac{1}{3} = 180,99 \text{ кПа.} \end{aligned}$$

Полученное расчетное значение избыточного давления паровоздушной смеси превышает 5 кПа, температура вспышки изопропилового спирта составляет +14 °С, следовательно, согласно таблице 2.1 производственное помещение относим к категории А (взрывопожароопасная).

Задача 2.2. Определить размеры зоны, ограниченной НКПРП газов, при аварийной разгерметизации емкости с метаном на открытом пространстве. При разгерметизации емкости в атмосферу поступит $m_r = 20$ кг метана. Емкость представляет собой цилиндр с основанием радиусом 1 м и высотой $h_{ист} = 10$ м. Расчетная температура $t_p = 35$ °С. Молярная масса метана равна $16,04$ кг·кмоль⁻¹. Нижний концентрационный предел распространения пламени метана $C_{НКПРП} = 5,28$ % (об.).

Решение

По формуле (2.4) определим плотность газа для расчетной температуры t_p :

$$\rho_r = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_p)} = \frac{16,04}{22,413 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 35)} = 0,634 \text{ кг/м}^3.$$

Расстояния $X_{НКПРП}$, $Y_{НКПРП}$ и $Z_{НКПРП}$ для метана, ограничивающие область концентраций, превышающих НКПРП, согласно формулам (2.11), (2.12) равны

$$X_{НКПРП} = Y_{НКПРП} = 14,6 \left(\frac{m_r}{\rho_r C_{НКПРП}} \right)^{0,33} = 14,6 \left(\frac{20}{0,645 \cdot 5,28} \right)^{0,33} = 26,332 \text{ м};$$

$$Z_{НКПРП} = 0,33 \left(\frac{m_r}{\rho_r C_{НКПРП}} \right)^{0,33} = 0,33 \left(\frac{20}{0,645 \cdot 5,28} \right)^{0,33} = 0,595 \text{ м}.$$

Таким образом, для расчетной аварийной разгерметизации емкости с метаном геометрически зона, ограниченная НКПРП газов, будет представлять цилиндр с основанием радиусом $R_3 = X_{НКПРП} = Y_{НКПРП} = 26,332$ м. Так как $R_3 > h_{ист}$, то высота зоны $h_3 = h_{ист} + R_3 = 10 + 26,332 = 36,332$ м. В пределах этой зоны создается взрывоопасная среда. За начало зоны, ограниченной НКПРП газов, принимают внешние габаритные размеры емкости.

Задача 2.3. Определить размеры зоны, ограниченной НКПРП паров, при аварийной разгерметизации трубопровода, транспортирующего ацетон. Трубопровод, транспортирующий ацетон, проложен на открытом пространстве на высоте $h_{ист} = 0,5$ м от поверхности земли. Трубопровод оснащен ручными задвижками. Масса паров ацетона, поступивших в открытое пространство за

время полного испарения, составляет $m_{\text{п}} = 240$ кг. Продолжительность поступления паров ЛВЖ в открытое пространство $T = 6500$ с. Температура воздуха $t_{\text{в}} = 36$ °С. Нижний концентрационный предел распространения пламени паров ацетона $C_{\text{НКПРП}} = 2,7$ % (об.). Давление насыщенного пара над жидкостью равно 184,9 и 421,7 мм рт. ст. при температуре воздуха 20 и 40 °С соответственно. Молярная масса ацетона равна $58,08$ кг·кмоль⁻¹.

Решение

По формуле (2.4) определим плотность жидкости для расчетной температуры $t_{\text{р}} = 36$ °С:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{M}{V_0 \cdot (1 + 0,00367 \cdot t_{\text{р}})} = \frac{58,08}{22,413 \cdot (1 + 0,00367 \cdot 36)} = 2,289 \text{ кг/м}^3.$$

Определим давление насыщенного пара $p_{\text{н}}$ при температуре воздуха 36 °С. Воспользуемся формулой линейной интерполяции, которая имеет вид

$$f(x) = f(x_i) + \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{x_{i+1} - x_i} \cdot (x - x_i).$$

Исходные данные для расчета $p_{\text{н}}$ при температуре воздуха 36 °С сведем в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Исходные данные для расчета $p_{\text{н}}$

$x = t_{\text{в}}$	$f(x) = p_{\text{н}}$
$x_1 = 20$	$f(x_1) = 283,6$
$x = 36$	$f(x) = ?$
$x_2 = 40$	$f(x_2) = 610,1$

$$p_{\text{н}}(t_{\text{в}}) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1) =$$

$$= 283,6 + \frac{610,1 - 283,6}{40 - 20} \cdot (36 - 20) = 544,8 \text{ мм рт. ст.};$$

$$p_{\text{н}}(t_{\text{в}}) = 544,8 \cdot 0,133 \text{ кПа} = 72,634 \text{ кПа}.$$

Расстояния $X_{\text{НКПРП}}$, $Y_{\text{НКПРП}}$ и $Z_{\text{НКПРП}}$ для ацетона, ограничивающие область концентраций, превышающих НКПРП, по формулам (2.13), (2.14) равны

$$\begin{aligned} X_{\text{НКПРП}} = Y_{\text{НКПРП}} &= 3,2\sqrt{K} \left(\frac{p_{\text{н}}}{C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} p_{\text{н}}} \right)^{0,33} = \\ &= 3,2 \sqrt{\frac{6500}{3600}} \left(\frac{72,622}{2,7} \right)^{0,8} \left(\frac{240}{2,289 \cdot 72,622} \right)^{0,33} = 67,586 \text{ м}; \\ Z_{\text{НКПРП}} &= 0,12\sqrt{K} \left(\frac{p_{\text{н}}}{C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} p_{\text{н}}} \right)^{0,33} = \\ &= 0,12 \sqrt{\frac{6500}{3600}} \left(\frac{72,622}{2,7} \right)^{0,8} \left(\frac{240}{2,289 \cdot 72,622} \right)^{0,33} = 2,534 \text{ м}. \end{aligned}$$

Таким образом, граница зоны, ограниченной НКПРП паров, по горизонтали будет проходить на расстоянии $R_3 = X_{\text{НКПРП}} = Y_{\text{НКПРП}} = 67,586$ м от обечайки (*обечайка* – открытый с торцов цилиндрический или конический барабан без днищ) трубопровода. Так как $h_{\text{ист}} < Z_{\text{НКПРП}}$, то высота зоны $h_3 = Z_{\text{НКПРП}} = 2,534$ м от поверхности земли. В пределах этой зоны создается взрывоопасная среда.

Задачи для самостоятельной работы

Задача 2.1. Определить категорию взрывопожарной и пожарной опасности помещения производственного участка. Геометрический объем помещения $V_{\text{п}}$. В нем установлена емкость объемом $V_{\text{емк}}$, в которой находится технологическая жидкость. Воздухообмен, создаваемый системами вентиляции, равен v , м/с. Район – г. Минск, температура воздуха в производственном помещении 35 °С. За аварийную ситуацию принимается разлив технологической жидкости в результате перфорации емкости. Испарение с обработанных деталей не учитывается из-за незначительного количества жидкости на их поверхности. Варианты заданий для самостоятельной работы представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Исходные данные к задаче 2.1

Вариант	Наименование технологической жидкости	Объем помещения $V_{п}$, м ³	Объем емкости $V_{емк}$, л	Скорость воздуха v , м/с
1	Амилацетат	$8 \times 19 \times 5$	25	0,1
2	Амилен	$7 \times 15 \times 6$	30	0,2
3	Анилин	$5 \times 17 \times 5$	35	0,3
4	Ацетон	$6 \times 18 \times 6$	40	0,4
5	н-Бутиловый спирт	$5 \times 18 \times 5$	50	0,5
6	н-Гексан	$7 \times 15 \times 6$	60	0,6
7	Диэтиловый эфир	$6 \times 16 \times 5$	75	0,7
8	Изопропил-бензол	$5 \times 17 \times 6$	80	0,8
9	Метиловый спирт	$6 \times 15 \times 5$	100	0,9
10	н-Пентан	$6 \times 18 \times 6$	150	1,0
11	Стирол	$9 \times 14 \times 5$	200	0,1
12	Толуол	$7 \times 19 \times 6$	250	0,2
13	Хлорбензол	$7 \times 15 \times 5$	300	0,3
14	Циклогексан	$6 \times 17 \times 6$	400	0,4
15	Этилацетат	$9 \times 18 \times 5$	500	0,5
16	н-Амиловый спирт	$8 \times 19 \times 5$	600	0,6
17	н-Додекан	$7 \times 15 \times 6$	700	0,7
18	Бензол	$5 \times 17 \times 5$	25	0,8
19	н-Бутилацетат	$6 \times 18 \times 6$	30	0,9
20	н-Гексадекан	$5 \times 18 \times 5$	35	1,0
21	Гептан	$7 \times 15 \times 6$	40	0,1
22	Глицерин	$6 \times 16 \times 5$	50	0,2
23	Диэтиламин	$5 \times 17 \times 6$	60	0,3
24	Изопентан	$6 \times 15 \times 5$	75	0,4
25	н-Ксилол	$6 \times 18 \times 6$	80	0,5
26	н-Нонан	$9 \times 14 \times 5$	100	0,6
27	н-Пентадекан	$6 \times 19 \times 6$	150	0,7
28	Пиридин	$7 \times 15 \times 5$	200	0,8
29	н-Тетрадекан	$6 \times 17 \times 6$	250	0,9
30	Уксусная кислота	$9 \times 18 \times 5$	300	1,0

Задача 2.2. Определить размеры зоны, ограниченной НКПРП газов, при аварийной разгерметизации емкости с ГГ на открытом пространстве. При разгерметизации емкости в атмосферу поступит масса газов m_r . Емкость представляет собой цилиндр с основанием радиусом 1 м и высотой $h_{ист}$. Расчетная температура t_p , °С. Молярная масса метана равна M , кг·кмоль⁻¹. Нижний концентрационный предел распространения пламени ГГ, $C_{НКПРП}$, % (об.). Варианты заданий для самостоятельной работы представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Исходные данные к задаче 2.2

Вариант	Наименование ГГ	Масса газа $m_{\text{г}}$, кг	Высота емкости $h_{\text{ист}}$, м	Молярная масса M , $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$	Температура расчетная $t_{\text{р}}$, °C	$C_{\text{НКПП}}$, % (об.)
1	Аммиак	20	10	17,03	21	15
2	Ацетилен	30	15	26,038	23	2,5
3	н-Бутан	40	10	58,123	25	1,8
4	Винилхлорид	20	15	62,499	27	3,6
5	Водород	30	10	2,016	31	4,12
6	Изобутан	40	15	58,123	33	1,81
7	Формальдегид	20	10	30,03	35	7,0
8	Оксид углерода	30	15	28,01	37	12,5
9	Пропан	40	10	44,096	39	2,3
10	Пропилен	20	15	42,080	22	2,4
11	Сероводород	30	10	34,076	24	4,3
12	Этилен	40	15	28,05	26	2,7
13	Хлорэтан	20	10	64,51	28	3,8
14	Этан	30	15	30,069	32	2,9
15	Изобутилен	40	10	56,11	34	1,78
16	1-Бутен	20	15	56,107	36	1,67
17	Оксид этилена	30	10	44,05	38	3,2
18	Формальдегид	40	15	30,03	39	7,0
19	2-Бутен	20	10	56,107	22	1,8
20	1,3-Бутадиен	30	15	54,091	24	2,0
21	Аммиак	40	10	17,03	26	15
22	Ацетилен	20	15	26,038	27	2,5
23	н-Бутан	30	10	58,123	35	1,8
24	Винилхлорид	40	15	62,499	37	3,6
25	Водород	20	10	2,016	39	4,12
26	Изобутан	30	15	58,123	22	1,81
27	Этан	40	10	30,069	37	2,9
28	Оксид углерода	20	15	28,01	23	12,5
29	Пропан	30	10	44,096	25	2,3
30	Пропилен	40	15	42,080	38	2,4

Задача 2.3. Определить размеры зоны, ограниченной НКППП паров, при аварийной разгерметизации трубопровода, транспортирующего ЛВЖ. Трубопровод, транспортирующий ЛВЖ, проложен на открытом пространстве на высоте $h_{\text{ист}}$, м, от поверхности земли. Трубопровод оснащен ручными задвижками. Масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время полного испарения, составляет $m_{\text{п}}$. В таблице 2.6 даны следующие значения:

продолжительность поступления паров ЛВЖ в открытое пространство T , с; температура воздуха t_v , °С; нижний концентрационный предел распространения пламени паров ацетона $C_{НКПРП}$, % (об.); давление насыщенного пара над жидкостью при температуре воздуха 20 и 40 °С соответственно; молярная масса ЛВЖ, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$. Варианты заданий для самостоятельной работы представлены также в таблице 2.6.

Справочные данные для расчетов приведены в таблицах 2.7–2.9.

Содержание отчета

- 1 Титульный лист.
- 2 Исходные данные в соответствии с вариантом.
- 3 Ход выполнения работы.
- 4 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Как определяют категории взрывопожарной опасности помещений и зданий с ГГ, ЛВЖ и ГЖ?
- 2 Как определяют категории пожарной опасности помещений и зданий?
- 3 Какие помещения и здания относят к категории взрывопожарной и пожарной опасности А, Б, В1–В4, Г1, Г2, Д?
- 4 Что называют пожарной/расчетной нагрузкой помещения?
- 5 Что такое свободный объем помещения?
- 6 Какие причины вызывают взрывы сосудов, работающих под давлением?
- 7 Какое явление называют BLEVE? В чем его сущность?
- 8 Какие причины вызывают явление BLEVE?
- 9 Какое явление называют «огненный шар»?
- 10 Что называют нижним (верхним) концентрационным пределом распространения пламени?

8 Таблица 2.6 – Варианты индивидуальных заданий для самостоятельной работы к задаче 2.3

Вариант	Наименование ЛВЖ	Масса паров ЛВЖ $m_{п}$, кг	Высота от поверхности земли до трубопровода $h_{ист}$, м	Молярная масса M , кг·кмоль ⁻¹	$C_{НКПРП}$, % (об.)	Давление насыщенного пара p_n (мм рт. ст.) над органической жидкостью при температуре (°C)		Температура воздуха $t_{в}$, °C	Продолжительность поступления паров ЛВЖ в открытое пространство T , с
						20 °C	40 °C		
1	Октан	150	0,5	114,23	0,9	10,5	31,1	21	3600
2	Бензол	160	0,6	78,113	1,43	75,2	183,8	22	4000
3	Гексан	180	0,7	86,177	1,24	121,2	279,4	23	4200
4	Гептан	210	0,8	100,203	1,07	35,4	92,5	24	4400
5	Метилацетат	290	0,9	74,08	3,15	170	401,1	25	4600
6	Дихлорэтан	240	0,6	98,96	6,2	66,6	164,4	26	4800
7	Изопропиловый спирт	250	0,7	60,09	2,23	32,4	105,3	27	5000
8	о-Ксилол	260	0,8	106,17	0,9	4,9	15,3	28	5200
9	п-Ксилол	270	0,5	106,17	1,1	6,5	19,8	29	5400
10	Метанол	280	0,6	32,04	6,98	97,4	264,7	30	5600
11	Метилацетат	290	0,7	74,08	3,15	170,0	401,1	31	5800
12	Муравьиная кислота	300	0,8	46,03	18	32,7	82,5	32	6000
13	Пропанол	310	0,5	60,095	2,2	14,4	50,2	33	6200
14	Сероуглерод	320	0,6	76,139	1,3	297,5	618,0	34	6400
15	Толуол	150	0,7	92,14	1,27	21,8	59,2	35	6600
16	Уксусная кислота	160	0,8	60,052	4	11,7	34,8	36	6800
17	Хлорбензол	180	0,5	112,56	1,4	8,8	26,0	37	7000
18	Циклогексан	210	0,6	84,16	1,3	77,5	184,7	39	7200
19	Этанол	235	0,7	46,068	3,28	43,9	135,3	21	7400

Продолжение таблицы 2.6

Вариант	Наименование ЛВЖ	Масса паров ЛВЖ $m_{п}$, кг	Высота от поверхности земли до трубопровода $h_{ист}$, м	Молярная масса M , кг·кмоль ⁻¹	$C_{НКПРП}$, % (об.)	Давление насыщенного пара p_n (мм рт. ст.) над органической жидкостью при температуре (°C)		Температура воздуха t_v , °C	Продолжительность поступления паров ЛВЖ в открытое пространство T , с
						20 °C	40 °C		
20	Этилацетат	240	0,8	88,11	2,0	72,8	186,2	22	7600
21	Этилбензол	250	0,5	106,167	0,8	7,1	21,5	23	7800
22	Этиловый эфир	260	0,6	74,12	1,9	439,8	921,1	24	8000
23	Октан	270	0,7	114,23	0,9	10,5	31,1	25	8200
24	Бензол	280	0,8	78,113	1,43	75,2	183,8	26	8400
25	Гексан	290	0,5	86,177	1,24	121,2	279,4	27	8600
26	Гептан	300	0,6	100,203	1,07	35,4	92,5	28	8800
27	Хлорбензол	180	0,9	112,56	1,4	8,8	26	29	9000
28	Дихлорэтан	320	0,8	98,96	6,2	66,6	164,4	30	9200
29	Изопропиловый спирт	150	0,5	60,09	2,23	32,4	105,3	31	9400
30	о-Ксилол	160	0,6	106,17	0,9	4,9	15,3	32	9600

Таблица 2.7 – Значения коэффициента Z участия горючих газов и паров ненагретых ЛВЖ во взрыве

Вид горючего вещества	Значение Z
Водород	1
Горючие газы (кроме водорода)	0,5
ЛВЖ и ГЖ, нагретые до температуры вспышки и выше	0,3
ЛВЖ и ГЖ, нагретые ниже температуры вспышки, при наличии возможности образования аэрозоля	0,3
ЛВЖ и ГЖ, нагретые ниже температуры вспышки, при отсутствии возможности образования аэрозоля	0

Таблица 2.8 – Показатели взрывопожароопасности веществ и материалов

Вещество	Химическая формула	Молярная масса M , кг·кмоль ⁻¹	Температура вспышки, °C	Константы уравнения Антуана			Характеристика вещества
				A	B	C_A	
Амилацетат	$C_7H_{14}O_2$	130,196	+43	6,29350	1579,51	221,365	ЛВЖ
Амилен	C_5H_{10}	70,134	-18	5,91048	1014,294	229,783	ЛВЖ
н-Амиловый спирт	$C_5H_{12}O$	88,149	48	6,3073	1287,625	161,33	ЛВЖ
Анилин	C_6H_7N	93,128	+73	6,04622	1457,02	176,195	ГЖ
Ацетон	$C_3H_6O_2$	58,08	-18	6,37551	1281,721	237,088	ЛВЖ
Бензол	C_6H_6	78,113	-11	6,10906	1252,776	225,178	ЛВЖ
н-Бутилацетат	$C_6H_{12}O_2$	116,16	29	6,25205	1430,418	210,745	ЛВЖ
н-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	74,122	+35	8,72232	2664,684	279,683	ЛВЖ
н-Гексадекан	$C_{16}H_{34}$	226,44	128	5,91242	1656,405	136,869	ГЖ
н-Гексан	C_6H_{14}	86,177	-23	5,99517	1166,274	223,661	ЛВЖ
Гептан	C_7H_{16}	100,203	-4	6,07647	1295,405	219,819	ЛВЖ
Глицерин	$C_3H_8O_3$	92,1	198	8,177393	3074,22	214,712	ГЖ
Диэтиламин	$C_4H_{11}N$	73,14	-14	6,34794	1267,557	236,329	ЛВЖ
Диэтиловый эфир	$C_4H_{10}O$	74,12	-41	6,12270	1098,945	232,372	ЛВЖ
н-Додекан	$C_{12}H_{26}$	170,337	77	7,29574	2463,739	253,884	ГЖ
Изопентан	C_5H_{12}	72,15	-52	5,91799	1022,551	233,493	ЛВЖ
Изопропилбензол	C_9H_{12}	120,20	+37	6,06756	1461,643	207,56	ЛВЖ
п-Ксилол	C_8H_{10}	106,17	26	6,25485	1537,082	223,608	ЛВЖ
Метиловый спирт	CH_4O	32,04	+6	7,3527	1660,454	245,818	ЛВЖ
н-Нонан	C_9H_{20}	128,257	31	6,17776	1510,695	211,502	ЛВЖ
н-Пентадекан	$C_{15}H_{32}$	212,42	115	6,0673	1739,084	157,545	ГЖ
н-Пентан	C_5H_{12}	72,150	-44	5,97208	1062,555	231,805	ЛВЖ
Пиридин	C_5H_5N	79,1	20	5,91684	1217,73	196,342	ЛВЖ
Стирол	C_8H_8	104,14	+30	7,06542	2123,057	272,986	ЛВЖ
н-Тетрадекан	$C_{14}H_{30}$	198,39	103	6,40007	1950,497	190,513	ГЖ
Толуол	C_7H_8	92,140	+7	6,0507	1328,171	217,713	ЛВЖ
Уксусная кислота	$C_2H_4O_2$	60,05	40	7,10337	1906,53	255,973	ЛВЖ
Хлорбензол	C_6H_5Cl	112,56	+29	6,38605	1607,316	235,351	ЛВЖ
Циклогексан	C_6H_{12}	84,16	-17	5,96991	1203,526	222,863	ЛВЖ
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	88,10	-3	6,22672	1244,951	217,881	ЛВЖ

Таблица 2.9 – Значение коэффициента η при различной скорости воздушного потока в помещении

Скорость воздушного потока в помещении, м/с	Значение коэффициента η при температуре t (°C) воздуха в помещении					
	10	15	20	30	35	37
0,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3	2,3
0,3	5,3	4,5	4,1	2,8	2,6	2,6
0,4	6,0	5,1	4,7	3,2	2,9	2,8
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2	3,1
0,6	7,3	6,3	5,9	4,0	3,5	3,4
0,7	7,9	6,9	6,4	4,4	3,8	3,7
0,8	8,6	7,5	6,8	4,8	4,1	4,0
0,9	9,3	8,1	7,3	5,2	4,4	4,3
1,0	10,0	8,7	7,7	5,6	4,6	4,4

Примечание – При отсутствии экспериментальных либо расчетных данных скорость воздушного потока следует принимать равной: 1 м/с – при наличии в помещении аварийной вентиляции; 0 м/с – при ее отсутствии.

Список использованных источников

1 ТКП 474-2013 Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности. – Введ. 2013-01-29. – Минск : Стройтехнорм, 2013. – 60 с.

2 СТБ 11.0.03-95 ССПБ. Пассивная противопожарная защита. Термины и определения. – Введ. 1995-10-01. – Минск : Белстандарт, 1995. – 26 с.

3 Правила устройства электроустановок. – Введ. 2003-01-01. – 7-е изд. – М. : ЗАО «Энергосервис», 2007. – 280 с.

4 Щербина, Н. В. Основы промышленной безопасности : учеб.-метод. пособие / Н. В. Щербина, В. С. Осипович, К. Д. Яшин. – Минск : БГУИР, 2016. – 95 с.

Тема 3. Проектирование и расчет производственного освещения

Цель: формирование у студентов знаний и навыков в области проектирования общего равномерного искусственного освещения.

План занятия:

- 1 Изучить теорию.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.
- 4 Оформить отчет.

Теоретические сведения

В соответствии с СН 2.04.03-2020 «Естественное и искусственное освещение» в зависимости от источника света различают естественное, искусственное и совмещенное (сочетание естественного и искусственного) освещение.

Естественное освещение – освещение помещений прямым или отраженным светом неба, проникающим через световые проемы в наружных ограждающих конструкциях. Естественное освещение производственных помещений может осуществляться через световые проемы в наружных стенах (*боковое*), через фонари, световые проемы в стенах в местах перепада высот здания (*верхнее*) или обоими способами одновременно (*комбинированное освещение*). Достоинства: экономичность, благоприятное воздействие на организм человека, естественная цветопередача предметов. Недостатки: переменно в течение суток, зависит от климатических, сезонных и географических условий.

Искусственное освещение создается электрическими источниками света (лампами накаливания, газоразрядными или светодиодными лампами).

По системе исполнения искусственное освещение подразделяют на *общее* освещение и *комбинированное*, создаваемое общим и местным освещением.

При *общем освещении* светильники размещены в верхней зоне помещения равномерно (*общее равномерное освещение*) или применительно к расположению оборудования (*общее локализованное освещение*). *Верхняя зона помещения* – пространство на высоте более 2 м от пола или площадки, на которой находится рабочее место. Общее равномерное освещение обеспечивает равномерное распределение светового потока по всему помещению без учета

расположения оборудования, а общее локализованное – с учетом расположения рабочих мест путем размещения светильников ближе к рабочим поверхностям.

Освещенность рабочей поверхности, создаваемая светильниками общего освещения в системе комбинированного освещения, должна составлять не менее 10 % от нормативной освещенности для комбинированного освещения при тех источниках света, которые применяют для местного освещения.

Местное освещение – это освещение, дополнительное к общему, создаваемое светильниками, концентрирующими световой поток непосредственно на рабочих местах и расположенными на высоте не более 2 м от пола. Местное освещение устанавливают при работах высокой точности, а также при необходимости создания определенного или изменяемого в процессе работы направления света.

Местное освещение предназначено для освещения только рабочих поверхностей и не создает необходимой освещенности даже на прилегающих к ним площадях. Применение только местного освещения, как стационарного, так и переносного, в производственных помещениях *не допускается*.

Совмещенное освещение – освещение, при котором недостаточное естественное освещение дополняется искусственным в течение рабочего дня для обеспечения нормативного уровня освещенности рабочей поверхности.

Совмещенное освещение помещений производственных зданий предусматривают для производственных помещений, в которых выполняются зрительные работы I–III разрядов; для производственных и других помещений в случаях, когда по условиям технологии, организации производства или климата в месте строительства требуются объемно-планировочные решения, которые не позволяют обеспечить нормативное значение КЕО (многоэтажные здания большой ширины, одноэтажные многопролетные здания с пролетами большой ширины и т. п.), а также в случаях, когда технико-экономическая целесообразность совмещенного освещения по сравнению с естественным подтверждена соответствующими расчетами; в соответствии с ТНПА по проектированию зданий и сооружений отдельных отраслей промышленности.

Система общего освещения должна соответствовать следующим требованиям:

- светильники должны быть оснащены антибликовыми приспособлениями (сетками, диффузорами и т. д.);
- часть света должна быть направлена на потолок и на верхнюю часть стен;
- светильники должны быть установлены вне поля зрительной видимости работника, чтобы уменьшить ослепление и сделать освещение более однородным.

По функциональному назначению искусственное освещение подразделяется на рабочее, аварийное (освещение безопасности и эвакуационное), охранное и дежурное.

Рабочее освещение следует предусматривать для всех помещений зданий, а также участков открытых пространств, предназначенных для работы, прохода людей и движения транспорта. Для общего искусственного освещения помещений следует использовать светодиодные или разрядные источники света, учитывая наибольшую световую отдачу и срок службы. Для освещения помещений следует использовать наиболее экономичные светодиодные светильники и светильники с газоразрядными лампами. Для местного освещения, кроме светодиодных и разрядных источников света, следует использовать лампы накаливания, в том числе галогенные. Применение ксеноновых ламп внутри помещений не допускается.

Нормирование естественного освещения. Непостоянство естественного света даже в течение короткого промежутка времени вызвало необходимость нормировать естественное освещение с помощью относительного показателя – коэффициента естественной освещенности – КЕО (e).

КЕО – это отношение естественной освещенности, создаваемой в некоторой точке заданной плоскости внутри помещения, к одновременному значению наружной горизонтальной освещенности, создаваемой светом полностью открытого небосвода, выраженное в процентах:

$$\text{КЕО}(e) = (E_{\text{вн}} / E_{\text{нар}}) \cdot 100 \%, \quad (3.1)$$

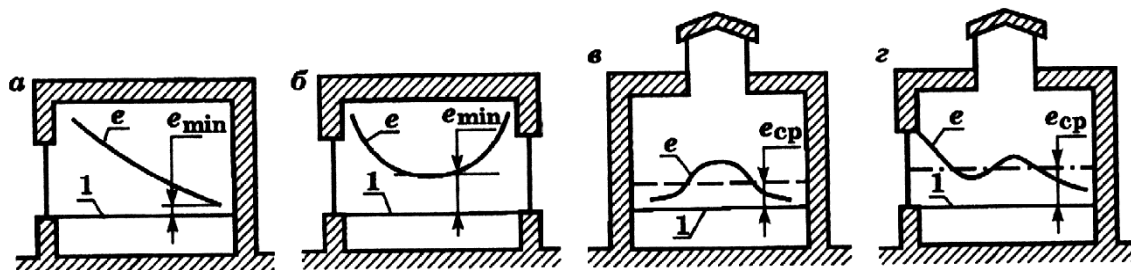
где $E_{\text{вн}}$ – освещенность какой-либо точки внутри помещения;

$E_{\text{нар}}$ – освещенность точки вне помещения.

Для производственных помещений глубиной до 6 м при одностороннем боковом освещении минимальное значение КЕО нормируется для точки, расположенной на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности на расстоянии 1 м от стены или линии заглубления зоны, наиболее удаленной от световых проемов (рисунок 3.1, *а*). При двустороннем боковом освещении (рисунок 3.1, *б*) – в точке посередине помещения на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности. При верхнем или комбинированном естественном освещении (рисунок 3.1, *в*, *г*) нормируется среднее значение КЕО для точек, расположенных на пересечении вертикальной плоскости характерного разреза помещения и условной рабочей поверхности

(или плоскости пола). Первая и последняя точки принимаются на расстоянии 1 м от поверхности стен (перегородок) или осей колонн.

Характерный разрез помещения – поперечный разрез посередине помещения, плоскость которого перпендикулярна к плоскости остекления световых проемов (при боковом освещении) или к продольной оси пролетов помещения. В характерный разрез помещения должны попадать участки с наибольшим количеством рабочих мест, а также точки рабочей зоны, наиболее удаленные от световых проемов.



а – одностороннее боковое освещение; *б* – двустороннее боковое освещение;
в – верхнее освещение; *г* – комбинированное освещение;
1 – уровень рабочей плоскости

Рисунок 3.1 – Схема распределения КЕО по разрезу помещения

Условная рабочая поверхность – условно принятая горизонтальная поверхность, расположенная на высоте 0,8 м от пола.

Нормирование совмещенного освещения. Совмещенное освещение, так же как и естественное, нормируют с помощью КЕО (коэффициента естественной освещенности) в зависимости от выполняемого разряда зрительной работы и конструктивного исполнения искусственного освещения (таблица 3.1). Совмещенное освещение оценивается при отключенных источниках искусственного света.

Основные требования к искусственному освещению производственных помещений. На промышленных предприятиях применяют общее освещение или комбинированное. Предпосылками для организации общего освещения являются следующие условия: а) возможность выполнения работ одного зрительного разряда по всему помещению; б) высокая плотность рабочих мест; в) невысокая точность работ.

Предпосылками для устройства комбинированного освещения являются: а) высокая точность работ; б) необходимость определенного направления света; в) невысокая плотность распределения рабочих мест в помещении.

Таблица 3.1 – Нормативные значения показателей естественного, искусственного и совмещенного освещения (выборка из СН 2.04.03-2020)

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение					Естественное освещение	Совмещенное освещение		
						Освещенность, лк			Сочетание нормируемых значений	КЕО, e_n , %				
						при системе комбинированного освещения		при системе общего освещения		при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	
						всего	в том числе от общего							показателя ослепленности P
Наивысшей точности	До 0,15	I	a	Малый	Темный	5000 4500	500	—	20 10	10	—	—	6,0	2,0
			б	Малый Средний	Средний Темный	4000 3500	400	1250 1000	20 10					
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	2500 2500 2000	300 300 200	750 750 600	20 20 10					
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	1500 1500 1250	200	400 400 300	20 20 10					
Очень высокой точности	От 0,15 до 0,30 включ.	II	a	Малый	Темный	4000 3500	400	— —	20 10	10	—	—	4,2	1,5
			б	Малый Средний	Средний Темный	3000 2500	300	750 600	20 10					
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	2000 2000 1500	200	500 500 400	20 20 10					
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	1000 1000 750		300 300 200	20 20 10					

Продолжение таблицы 3.1

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение					Естественное освещение	Совмещенное освещение		
						Освещенность, лк			Сочетание нормируемых значений	КЕО, e_n , %				
						при системе комбинированного освещения		при системе общего освещения		при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	
						всего	в том числе от общего							показателя ослепленности P
Высокой точности	Св. 0,30 до 0,50 включ.	III	а	Малый	Темный	2000 1500	200	500 400	40 20	15	—	—	3,0	1,2
			б	Малый Средний	Средний Темный	1000 750		300 200	40 20					
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	750 750 600		300 300 200	40 40 20					
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	400		200	40					
Средней точности	Св. 0,5 до 1,0 включ.	IV	а	Малый	Темный	750	200	300	40	20	4	1,5	2,4	0,9
			б	Малый Средний	Средний Темный	500		200						
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный	400								
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний	—	—							

Продолжение таблицы 3.1

Характеристика зрительной работы	Наименьший или эквивалентный размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Подразряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Искусственное освещение					Естественное освещение	Совмещенное освещение		
						Освещенность, лк			Сочетание нормируемых значений	КЕО, e_n , %				
						при системе комбинированного освещения		при системе общего освещения		при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	при верхнем или комбинированном освещении	при боковом освещении	
						всего	в том числе от общего							показателя ослепленности P
Малой точности	Св. 1 до 5 включ.	V	а	Малый	Темный	400	200	300	40	20	3	1	1,8	0,6
			б	Малый Средний	Средний Темный	—	—	200						
			в	Малый Средний Большой	Светлый Средний Темный									
			г	Средний Большой Большой	Светлый Светлый Средний									
Грубая (очень малой точности)	Более 5	VI	—	Независимо от характеристик фона и контраста объекта с фоном		—	—	200	40	20	3	1	1,8	0,6

Требования, которым должно отвечать освещение на рабочем месте:

- освещенность должна соответствовать характеру зрительной работы;
- яркость света должна быть достаточной;
- равномерное распределение светового потока по рабочей поверхности;
- источник света не должен слепить глаза;
- освещение должно быть рассеянным и не создавать глубоких теней;
- величина освещения постоянна во времени (K_p не превышает нормативных значений);
- оптимальный спектральный состав;
- все элементы осветительных установок должны быть долговечны, взрыво-, пожаро-, электробезопасны.

Нормирование и гигиеническая оценка производственного освещения. При создании системы производственного освещения руководствуются СН 2.04.03-2020 (см. таблицу 3.1). Нормы освещенности построены на основе классификации работ по определенным количественным признакам.

Производственное освещение нормируется в зависимости: от точности зрительной работы, яркости фона, контраста объекта и фона, системы освещения.

Точность зрительной работы характеризуется минимальным размером объекта различения. *Объект различения* – это элемент рассматриваемого объекта минимального размера, который нужно узнавать и различать. По степени точности все зрительные работы делятся на восемь разрядов. В свою очередь разряды делятся на четыре подразряда в зависимости от характеристики фона и контраста между объектом и фоном. Деление разрядов зрительных работ на подразряды дает возможность более дифференцированно выбрать освещенность для каждой зрительной работы.

Гигиеническая оценка производственного освещения заключается в измерении или расчете фактической освещенности на рабочей поверхности и сравнении ее с нормативным значением в зависимости от вида работ. Рабочей считается поверхность, на которой непосредственно производится работа.

Нормирование искусственного освещения осуществляется непосредственно по минимальной освещенности рабочей поверхности (E , лк) в соответствии с СН 2.04.03-2020.

Нормируемые значения освещенности, отличающиеся на одну ступень, следует принимать по шкале: 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 10; 15; 20; 30; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 500; 600; 750; 1000; 1250; 1500; 2000; 2500; 3000; 3500; 4000; 4500; 5000 лк.

В ряде случаев нормы освещенности необходимо повышать или понижать на одну ступень по шкале освещенности. Например, если работа связана с повышенной опасностью травматизма, размещением деталей на движущихся поверхностях, если напряженная зрительная работа производится непрерывно в течение рабочего дня или различаемые объекты расположены от глаз далее, чем на 0,5 м, нормы освещенности повышают на одну ступень согласно специальной шкале освещенности. В помещениях, где выполняются работы IV–VI разрядов, нормы освещенности следует снижать на одну ступень при кратковременном пребывании людей или при наличии оборудования, не требующего постоянного обслуживания.

Расчет общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей при отсутствии затемняющего оборудования производится методом коэффициента использования светового потока.

Порядок выполнения расчета общего равномерного искусственного освещения для производственного помещения представляет собой последовательное решение следующих задач:

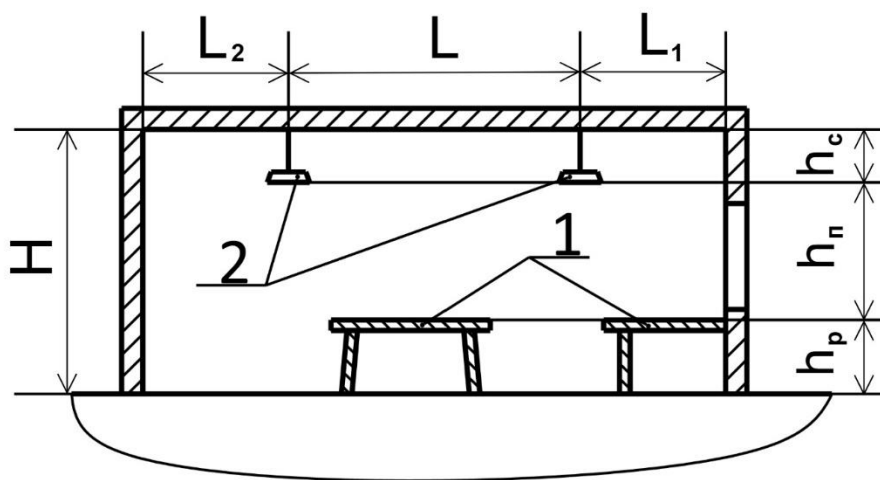
- 1 Выбор типа источника света.
- 2 Выбор типа светильника исходя из характеристик помещения.
- 3 Определение расчетной высоты подвеса светильника $h_{\text{п}}$ (рисунок 3.2):

$$h_{\text{п}} = H - h_{\text{с}} - h_{\text{р}}, \text{ м}, \quad (3.2)$$

где H – высота помещения, м;

$h_{\text{с}}$ – высота свеса светильника от потолка, м ($h_{\text{с}} = \text{от } 0 \text{ до } 1,5 \text{ м}$);

$h_{\text{р}}$ – высота освещаемой рабочей поверхности ($h_{\text{р}} = 0,8 \text{ м}$).



1 – рабочие поверхности; 2 – светильники

Рисунок 3.2 – Разрез помещения

4 Определение расстояния между светильниками (рядами светильников) L по формуле:

$$L = \lambda \cdot h_{\text{п}}, \text{ м}, \quad (3.3)$$

где λ – оптимальное отношение расстояния между светильниками L к высоте их подвеса $h_{\text{п}}$ (см. таблицу 3.7 на с. 87).

5 Размещение светильников на плане помещения. Предварительно необходимо определить расстояние от крайнего светильника (ряда светильников) до стены помещения по следующим формулам:

– если рабочие места расположены у стен:

$$L_1 = 0,25 \cdot L, \text{ м}; \quad (3.4)$$

– если у стен расположены проходы:

$$L_2 = 0,4 \cdot L, \text{ м}. \quad (3.5)$$

Затем производится оценка количества рядов, которые можно разместить в помещении:

$$2 \cdot L_{1(2)} + L \cdot (n_p - 1) \leq b; \quad (3.6)$$

откуда $n_p \leq (b - 2 \cdot L_{1(2)}) / L + 1$, где n_p – количество рядов в помещении; b – ширина помещения, м.

6 Определение количества светильников в ряду, с учетом того, что сумма расстояний от светильников до стен и длины светильников должна быть меньше длины помещения. Количество светильников рассчитывается по формуле

$$2 \cdot L_{1(2)} + L_{\text{св}} \cdot n_{\text{св}} \leq a; \quad (3.7)$$

откуда $n_{\text{св}} \leq (a - 2 \cdot L_{1(2)}) / L_{\text{св}}$, где $n_{\text{св}}$ – количество светильников в ряду; a – длина помещения, м; $L_{\text{св}}$ – длина светильника, м.

По полученным данным на плане помещения, вычерченном в масштабе, производится окончательное уточнение расположения светильников и их количества.

7 Определение коэффициента использования светового потока η – в зависимости от индекса помещения, от типа светильника и коэффициентов отражения потолка $\rho_{\text{п}}$, стен $\rho_{\text{с}}$ и рабочей поверхности $\rho_{\text{р.п}}$ (см. таблицу 3.5 на с. 86).

Индекс помещения определяется по формуле

$$i = \frac{a \cdot b}{h_{\text{п}} \cdot (a + b)}, \quad (3.8)$$

где i – индекс помещения;

a и b – длина и ширина помещения, м.

8 Расчет светового потока лампы, необходимого для создания на рабочих поверхностях освещенности на все время эксплуатации осветительной установки. Световой поток лампы определяется по формуле

$$F = \frac{E_{\text{мин}} \cdot S \cdot K_3 \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta}, \quad (3.9)$$

где F – световой поток одной лампы, лм;

$E_{\text{мин}}$ – нормативная минимальная освещенность, лк (см. таблицу 3.1);

S – освещаемая площадь помещения, м²;

K_3 – коэффициент запаса, учитывающий запыленность светильников и износ источников света в процессе эксплуатации (см. таблицу 3.4 на с. 85);

N – число светильников на плане помещения;

n – число ламп в одном светильнике;

η – коэффициент использования светового потока (в долях), определяется по таблице 3.5 (см. с. 86);

Z – коэффициент неравномерности минимальной освещенности. Рекомендуется принимать значение Z для люминесцентных ламп равным 1,1:

$$Z = E_{\text{ср}} / E_{\text{мин}}. \quad (3.10)$$

9 Выбор ближайшей стандартной лампы по полученному в результате расчета требуемому световому потоку. Допускается отклонение Δ светового потока лампы не более чем на $-10...+20$ %. Для этого выполняется проверка по формуле

$$\Delta = \frac{F_{\text{станд}} - F_{\text{рас}}}{F_{\text{рас}}}. \quad (3.11)$$

10 При невозможности выбора лампы с таким приближением – корректировка количества светильников в помещении.

Пример решения задачи

Задача. Рассчитать общее равномерное искусственное освещение для производственного помещения. Длина помещения – 15 м, ширина – 6 м, высота – 4 м. В помещении проводятся работы высокой точности разряда IIIa. Воздушные условия – нормальные (содержание в воздушной среде рабочей зоны пыли, дыма и копоти составляет менее 1 мг/м³). Коэффициенты отражения: от потолка – 70 %; от стен – 50 %; от рабочей поверхности – 10 %.

Решение. Для помещения с нормальными воздушными условиями выберем светильник типа ЛПО 46-004 (см. таблицу 3.6 на с. 87), длина светильника 1535 мм. Выбираем модель на два источника света (две лампы) мощностью по 58 Вт.

Определим расчетную высоту подвеса светильника $h_{\text{п}}$ в соответствии с рисунком 3.2 по формуле (3.2):

$$h_{\text{п}} = 4 - 1 - 0,8 = 2,2 \text{ м.}$$

Рассчитаем расстояния между рядами L по формуле (3.3), расстояния от стен до крайних рядов L_1 (если у стен рабочие места) по формуле (3.4) и L_2 (если у стен проходы) по формуле (3.5):

$$L = 1,8 \cdot 2,2 = 3,96 \text{ м;}$$

$$L_1 = 0,25 \cdot 3,96 = 0,99 \text{ м;}$$

$$L_2 = 0,4 \cdot 3,96 = 1,584 \text{ м.}$$

Оценим, сколько рядов можно разместить в помещении шириной 6 м по формуле (3.6):

– если рабочие места расположены у стен:

$$n_{\text{р}} \leq (6 - 2 \cdot 0,99) / 3,96 + 1 \leq 2,015 \approx 2 \text{ ряда;}$$

– если у стен расположены проходы:

$$n_p \leq (6 - 2 \cdot 1,584) / 3,96 + 1 \leq 1,715 \approx 1 \text{ ряд.}$$

Таким образом, в производственном помещении длиной 15 м и шириной 6 м рекомендуется разместить светильники ЛПО 46-004 длиной 1535 мм в два ряда при расположении рабочих мест у стен и в один ряд при расположении у стен проходов.

Определим количество светильников в ряду по формуле (3.7):

– если рабочие места расположены у стен:

$$n_{\text{св}} \leq \frac{15 - 2 \cdot 0,99}{1,535} \leq 8,48 \approx 8 \text{ шт.};$$

– если у стен расположены проходы:

$$n_{\text{св}} \leq \frac{15 - 2 \cdot 1,584}{1,535} \leq 7,71 \approx 7 \text{ шт.}$$

Таким образом, если рабочие места расположены у стен, то в одном ряду рекомендуется разместить восемь светильников ЛПО 46-004 длиной 1535 мм; если у стен расположены проходы, то в одном ряду рекомендуется разместить семь светильников ЛПО 46-004 длиной 1535 мм.

Рассчитаем индекс помещения по формуле (3.8):

$$i = \frac{15 \cdot 6}{2,2 \cdot (15 + 6)} = 1,95.$$

По таблице 3.5 (см. с. 86) определим коэффициент использования светового потока η , который равен 61 %.

Рассчитаем световой поток для одного источника света. Для этого определим нормируемую минимальную освещенность по таблице 3.1. Согласно характеристике выполняемых работ (IIIa) в помещении при организации системы общего освещения рекомендовано $E_{\text{мин}}$ 500 или 400 лк. Для дальнейшего расчета возьмем $E_{\text{мин}}$, равное 400 лк.

Световой поток для одного источника света определим по формуле (3.9):

– если рабочие места расположены у стен:

$$F = \frac{400 \cdot 15 \cdot 6 \cdot 1,4 \cdot 1,1}{2 \cdot 8 \cdot 2 \cdot 0,61} = 2840 \text{ лм};$$

– если у стен расположены проходы:

$$F = \frac{400 \cdot 15 \cdot 6 \cdot 1,4 \cdot 1,1}{1 \cdot 7 \cdot 2 \cdot 0,61} = 6492 \text{ лм}.$$

По расчетному световому потоку источника света выбираем стандартную лампу по таблице 3.3 (см. с. 85).

Допустимое отклонение Δ светового потока стандартного от расчетного должно быть не более чем на $-10...+20$ %. В случае превышения допустимого отклонения светового потока количество светильников в ряду можно уменьшить при условии, что максимальное расстояние между светильниками в ряду не превышает расчетное расстояние $L_{1(2)}$.

К светильнику ЛПО 46-004 длиной 1535 мм подберем лампу Osram Natura L 58W со световым потоком 2850 лм, мощностью 68 Вт и длиной 1514 мм для варианта расположения рабочих мест у стен. В случае проходов у стен – лампа Osram L58W/840 со световым потоком 6200 лм, мощностью 68 Вт и длиной 1514 мм.

Проверим допустимое отклонение Δ светового потока лампы стандартного от расчетного, которое должно быть не более чем на $-10...+20$ %. Для этого воспользуемся формулой (3.11):

– если рабочие места расположены у стен:

$$\Delta = \frac{2850 - 2840}{2840} = 0,0035;$$

– если у стен расположены проходы:

$$\Delta = \frac{6200 - 6492}{6492} = -0,045.$$

Таким образом, в обоих случаях отклонение составило 0,35 и $-4,5$ %, что является допустимым.

Вывод. В помещении размерами $15 \times 6 \times 4$ м можно разместить:

1) 2 ряда светильников по 8 в каждом. Тип светильника ЛПО 46-004 длиной 1535 мм, люминесцентная лампа к нему Osram Natura L 58W со световым

потоком 2850 лм, мощностью 68 Вт и длиной 1514 мм. Рабочие места расположены у стен;

2) 1 ряд – 7 светильников. Тип светильника ЛПО 46-004 длиной 1535 мм, люминесцентная лампа к нему Osram L 58W/840 со световым потоком 6200 лм, мощностью 68 Вт и длиной 1514 мм. У стен расположены проходы.

Задача для самостоятельной работы

Выполнить проектирование общего равномерного искусственного освещения для производственного помещения. Исходные данные представлены в таблице 3.2. В таблицах 3.3–3.7 приведены справочные данные, необходимые для выполнения расчета светового потока лампы.

Таблица 3.2 – Исходные данные

Вариант	Размеры помещения (длина, ширина, высота), м	Разряд зрительной работы	Содержание в воздушной среде рабочей зоны пыли, дыма и копоти, мг/м ³	Коэффициенты отражения поверхностей		
				ρ_n , %	ρ_c , %	ρ_p , %
1	20 × 7 × 4	IIIa	От 1 до 5	70	50	30
2	22 × 16 × 4	IIIв	От 1 до 5	70	50	10
3	24 × 18 × 4	IIIa	От 1 до 5	50	30	10
4	22 × 20 × 4	IIв	Менее 1	30	10	10
5	20 × 12 × 4	IIIa	От 1 до 5	50	30	10
6	30 × 21 × 4	IIв	Менее 1	70	50	30
7	12 × 8 × 4	IIг	От 1 до 5	50	30	10
8	14 × 10 × 4	IIIб	Менее 1	70	50	10
9	16 × 10 × 4	IIIб	От 1 до 5	70	50	10
10	10 × 8 × 4	Vб	Менее 1	50	30	10
11	12 × 8 × 4	IIIв	От 1 до 5	70	50	10
12	14 × 11 × 4	IVг	От 1 до 5	70	50	30
13	16 × 13 × 4	IVa	Менее 1	50	30	20
14	20 × 16 × 4	IVa	От 1 до 5	70	50	30
15	16 × 12 × 4	IVa	От 1 до 5	70	50	10
16	22 × 17 × 4	IIв	Менее 1	50	30	10
17	24 × 12 × 4	IIIa	От 1 до 5	50	30	10
18	26 × 14 × 4	IIIa	От 1 до 5	70	50	10
19	28 × 16 × 4	Iг	Менее 1	70	50	10
20	26 × 18 × 4	IIв	От 1 до 5	70	50	10
21	24 × 20 × 4	IIIa	От 1 до 5	50	30	10
22	22 × 12 × 4	Iг	Менее 1	50	30	10
23	20 × 14 × 4	IVa	От 1 до 5	50	30	10
24	28 × 10 × 4	Va	От 1 до 5	70	50	30
25	16 × 10 × 4	IVб	От 1 до 5	30	10	10
26	16 × 8 × 4	IVв	Менее 1	50	30	10

Продолжение таблицы 3.2

Вариант	Размеры помещения (длина, ширина, высота), м	Разряд зрительной работы	Содержание в воздушной среде рабочей зоны пыли, дыма и копоти, мг/м ³	Коэффициенты отражения поверхностей		
				ρ_n , %	ρ_c , %	ρ_p , %
27	28 × 10 × 4	IVГ	От 1 до 5	50	30	10
28	22 × 14 × 4	IIв	Менее 1	70	50	30
29	24 × 10 × 4	IVа	От 1 до 5	70	50	30
30	16 × 10 × 4	Vа	Менее 1	70	50	30

Таблица 3.3 – Технические данные люминесцентных ламп

Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Длина лампы, мм
ФС ЛТ 18 ВТ / 640 G13 T8	18	1200	1200
Osram L 36W/77	36	1400	
Osram L 18W	18	1600	
Osram Natura L 36W/76	36	1800	
AL T8-18-865-1200-M	18	2000	
LED-T8-II-PRO	20	2000	
Osram L36W/765	36	2500	
Osram L 36W/640	36	2850	
Osram L 36W/865	36	3250	
Osram L 36W/840	36	3350	
Osram T8 G13	36	6500	
FL-LED T8-1200	20	2000	1214
FL 36W/765	36	2400	
FL 36W/640	36	2600	
FL 36W/635	36	2800	
TL-D 36W/33-640	36	2850	
Osram 20W	20	2300	1514
FL-LED T8-1500	26	2600	
Osram Natura L 58W	58	2850	
Osram T8-M-PRO	32	3200	
Osram L58W/765	58	4000	
T8-58W/765-KC	58	4250	
Osram L58W/640	58	4600	
Osram G13 L58W/865	58	5000	
Osram L58W/830	58	5200	
Osram L58W/840	58	6200	

Таблица 3.4 – Коэффициент запаса K_z для искусственного освещения

Производственные помещения с воздушной средой, содержащей в рабочей зоне	Коэффициент запаса K_z
свыше 5 мг/м ³ пыли, дыма, копоти	1,6–2,0
от 1 до 5 мг/м ³ пыли, дыма, копоти	1,6–1,8
менее 1 мг/м ³ пыли, дыма, копоти	1,4–1,5

Таблица 3.5 – Коэффициенты использования светового потока

Тип светильника	ЛСП 01	ЛПО 46	ПВЛМ (ЛСП 22)	ЛСП 44	ЛСП 49М
$\rho_{\text{п}}, \%$	70 70 50 30 0	70 70 50 30 0	70 70 50 30 0	70 70 50 30 0	70 70 50 30 0
$\rho_{\text{с}}, \%$	50 50 30 10 0	50 50 30 10 0	50 50 30 10 0	50 50 30 10 0	50 50 30 10 0
$\rho_{\text{р}}, \%$	30 10 10 10 0	30 10 10 10 0	30 10 10 10 0	30 10 10 10 0	30 10 10 10 0
i	Коэффициент использования $\eta, \%$				
0,5	28 27 21 18 16	30 28 20 16 14	22 18 13 11 9	28 27 20 13 11	27 26 21 16 15
0,6	33 32 25 22 20	34 32 24 20 18	25 23 17 14 12	33 32 22 17 14	32 30 24 20 18
0,7	38 36 30 26 24	38 36 29 24 22	28 27 20 16 15	38 36 27 20 17	40 37 31 27 25
0,8	42 39 33 29 28	42 40 32 27 24	31 29 23 19 17	42 40 30 23 20	40 37 31 27 25
0,9	46 42 37 32 31	47 43 36 30 28	34 32 26 21 19	47 44 34 26 22	44 40 34 30 28
1,0	49 45 40 35 34	50 46 39 33 30	37 34 28 23 21	51 47 37 29 25	47 43 37 32 30
1,1	52 48 42 38 36	53 49 41 35 32	39 36 30 25 23	54 50 39 31 27	49 45 39 34 32
1,25	55 50 45 40 39	56 52 44 38 35	42 38 32 27 25	57 53 42 34 29	52 48 42 37 34
1,5	60 54 49 45 44	61 56 48 42 39	46 42 36 30 28	63 57 47 38 33	56 51 46 41 38
1,75	63 57 52 48 47	65 59 52 46 42	49 44 38 33 30	67 61 50 42 36	59 54 49 44 41
2,0	65 59 55 51 49	68 61 54 48 44	51 46 40 35 32	70 63 53 44 38	62 56 50 46 43
2,25	68 62 57 53 52	70 64 56 50 46	53 48 42 37 34	73 66 55 47 40	61 58 52 48 45
2,5	70 63 58 55 54	73 66 58 52 48	55 50 43 39 35	76 68 57 49 42	69 63 53 47 41
3,0	73 65 61 58 56	76 68 60 55 50	58 52 45 41 37	80 71 60 52 44	68 62 56 52 48
3,5	75 67 62 60 58	78 69 62 57 52	60 53 47 43 39	82 73 62 54 46	70 63 57 53 50
4,0	77 68 64 61 69	80 71 64 59 53	61 54 48 44 40	85 75 64 56 48	72 64 68 55 51
5,0	80 70 67 65 62	84 74 67 62 56	65 57 51 48 43	90 79 69 61 52	76 66 61 58 53

Таблица 3.6 – Сортамент и рекомендации по применению светильников с люминесцентными лампами

Серия, тип	Число, шт; мощность, Вт	Исполнение, характеристика помещения, модификация	Длина, мм
ЛСП 01 Норд	1 × 36	Светильники предназначены для освещения складских и промышленных помещений с повышенной влажностью и запыленностью. Можно использовать как внутри, так и снаружи помещения, степень защиты IP65	1260
	2 × 36		1275
ЛСП-49М/49Э Dozer IP65	1 × 36 2 × 36	Пылевлагозащищенные светильники со степенью защиты IP65 предназначены для помещений с повышенным содержанием пыли и влаги	1270
ЛСП 44 IP65	1 × 36 2 × 36	Влагозащищенный светильник со степенью защиты IP65, который можно использовать для освещения как внутри складских и промышленных помещений с повышенной влажностью и запыленностью, так и снаружи зданий – для дворовых территорий	1279
	1 × 58 2 × 58		1580
ПВЛМ (ЛСП 22) 2х36-22 IP53	2 × 36	Предназначены для освещения производственных цехов, складов и других помещений с повышенным содержанием пыли и влаги, внутри помещений или под навесом	1325
	2 × 58		1625
ЛПО 01 Кристалл	1 × 36	Предназначены для общего освещения жилых, офисных, складских и промышленных помещений. Можно использовать только внутри помещения, так как степень защиты соответствует IP20	1235
	2 × 36		1240
ЛПО 46-702 Norma	1 × 36	Предназначены для общего освещения жилых, офисных, складских и промышленных помещений. Можно использовать только внутри помещения, IP20	1250
	2 × 36		1245
	4 × 36		1255
ЛПО 46-004 Luxe	1 × 36	Предназначены для общего освещения жилых, офисных, складских и промышленных помещений. Можно использовать только внутри помещения, IP20	1250
	2 × 36		1235
	1 × 58		1550
	2 × 58		1535

Таблица 3.7 – Оптимальные значения соотношения расстояний (λ) между светильниками с люминесцентными лампами и высоты их подвеса над рабочей поверхностью

Тип светильника	Расположение светильников	
	однорядное	многорядное
Светильники ЛСП 01, ЛСП 22	1,35 (1,7)	1,8 (2,3)
Светильники ЛСП 44, ЛСП 49	1,25 (1,5)	1,5
Светильники ЛПО 46-702, ЛПО 46-004	1,4 (1,7)	1,6 (1,8)

Примечание – В скобках указаны максимальные допустимые значения λ .

Содержание отчета

- 1 Титульный лист.
- 2 Исходные данные в соответствии с вариантом.
- 3 Ход выполнения работы.
- 4 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какие виды освещения различают в зависимости от источника света?
- 2 Какие требования предъявляют к системам общего освещения?
- 3 Какие виды освещения различают по функциональному назначению?
- 4 Перечислите основные предпосылки для организации искусственного общего освещения.
- 5 Перечислите основные предпосылки для организации комбинированного освещения.
- 6 Какие требования предъявляют к организации освещения на рабочем месте?
- 7 Какими показателями нормируется производственное освещение?
- 8 Какие показатели и характеристики производственного освещения влияют на выбор нормируемого значения в СН 2.04.03-2020?
- 9 Как определяется КЕО в производственном помещении?
- 10 Что называют условной рабочей поверхностью?

Список использованных источников

- 1 СН 2.04.03-2020 Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы проектирования. – Введ. 2021–03–24. – Минск : Стройтехнорм, 2021. – 86 с.
- 2 Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Знак, 2006. – 972 с.
- 3 Щербина, Н. В. Охрана труда. Проектирование и расчет производственного освещения : метод. пособие / Н. В. Щербина, Д. А. Мельниченко, А. В. Копыток. – Минск : БГУИР, 2009. – 36 с.

Тема 4. Моделирование и системный анализ происшествий с помощью диаграмм типа «дерево»

Цель: формирование у студентов знаний и навыков в области моделирования происшествий для анализа развития аварийной ситуации с помощью логико-графических методов «дерево отказов» и «дерево событий».

План занятия:

- 1 Изучить теорию.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.
- 4 Оформить отчет.

Теоретические сведения

Тщательный анализ причин отказов и выработка мероприятий, наиболее эффективных для их устранения, способствуют построению дерева отказов и неработоспособных состояний. Такой анализ проводят для каждого периода функционирования, каждой части или системы в целом.

Дерево отказов (аварий, происшествий, последствий, нежелательных событий, несчастных случаев и пр.) лежит в основе логико-вероятностной модели причинно-следственных связей отказов системы с отказами ее элементов и другими событиями (воздействиями). При анализе возникновения отказа оно состоит из последовательностей и комбинаций нарушений и неисправностей, и таким образом дерево отказов представляет собой многоуровневую графологическую структуру причинных взаимосвязей, полученных в результате прослеживания опасных ситуаций в обратном порядке, для того чтобы отыскать возможные причины их возникновения (рисунок 4.1).

При описании метода дерева отказов используют следующие понятия: *событие, отказ, нормальное событие, основное событие, первичное событие, вторичное событие, головное событие*.

Событие – это авария, травма, отказ от какого-то элемента или устройства. Частота этих событий связана с количеством работающих и продолжительностью работы. Частота событий трактуется как вероятность, лежащая между 0 и 1.

$$0 \leq P_i \leq 1, \quad (4.1)$$

где P_i – вероятность какого-то события.

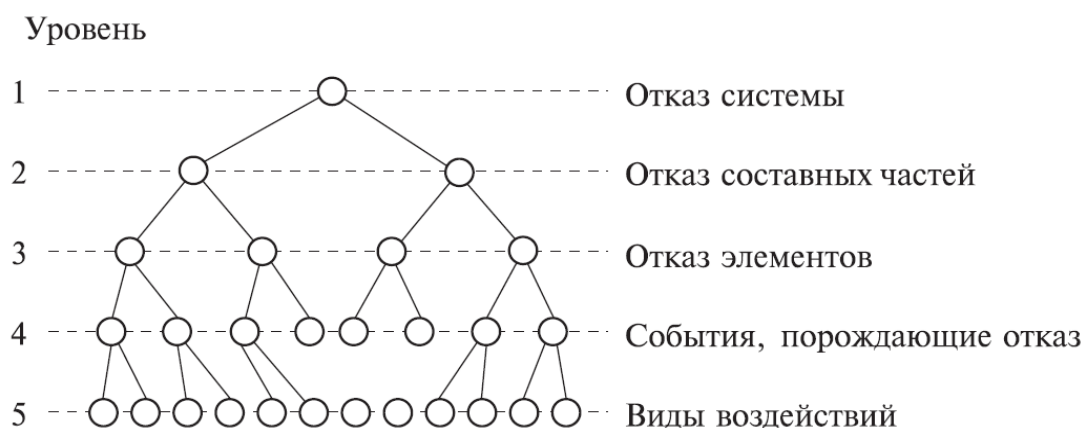


Рисунок 4.1 – Граф дерева отказов

Дерево отказов строится от начального события, которое является аварией, несчастным случаем.

Событие определяется на уровне системы или компонента (например, отказ реле А; отказ реле А вызван предельной температурой; режим работы системы изменяется при отказе реле А).

События бывают:

- *нормальные* – это события, которые могут появиться или не появиться в определенное время. Такое событие может рассматриваться как *отказ*, если оно произошло не вовремя;

- *основные* – это события, которые появляются на элементном уровне. Под элементом имеется в виду наименьшая анализируемая составная часть системы;

- *первичные* – это события, вызванные особенностями самого компонента. Например, отказ работы электролампы, связанный с перегоранием нити накала;

- *вторичные* – это события, вызванные внешней причиной. Например, отказ работы электролампы, связанный со скачком напряжения в сети;

- *головные* – это события при вершине дерева отказов, которые анализируются с помощью всей остальной части дерева. Обычно это результирующий отказ, выводящий систему из нормального состояния;

- *отказ*.

Виды отказа:

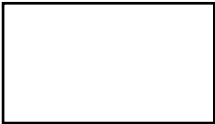
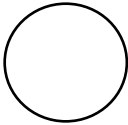
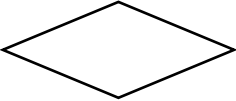
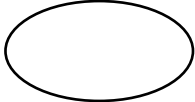
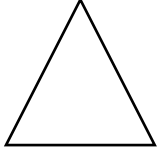
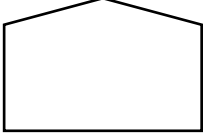
- *первичный* – событие, вызванное особенностями самого элемента системы, например его износом или производственным дефектом;

- *вторичный* – событие, вызванное внешними причинами (отказ других элементов, отклонение условий внешней среды и т. д.);

- *ошибочная команда* – неправильный сигнал управления, ошибочные действия оператора, сигналы помех.

Символы событий приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Символы событий

Символ события	Содержание события
	Символ «прямоугольник». Негативное событие, которое располагают в верхней части дерева и которое может располагаться по всему дереву. Символ «прямоугольник» используют, чтобы указать другие события, которые можно разбить на более мелкие. Это единственный символ, который будет иметь логический вентиль и входные события под ним
	Символ «круг». Исходное событие / отказ отдельного элемента, обеспеченные достаточными данными. Данные события находятся на нижних ярусах дерева и не требуют дальнейшего развития или разбивки
	Символ «ромб». Событие, которое далее не анализируется. Такое событие не полностью разработано из-за отсутствия информации или значимости. Ветвь дерева отказов может заканчиваться ромбом
	Символ «овал». Особая ситуация, которая может произойти только при определенных обстоятельствах. Само обстоятельство указывают внутри символа. Например, если переключатели должны быть выбраны в определенной последовательности, прежде чем произойдет действие
	Символ «треугольник». Перенос ветви дерева отказов в другое место в дереве. Там, где треугольник соединяется с деревом стрелкой, все, что показано ниже точки соединения, переносится в другую область дерева. Эта область обозначена соответствующим треугольником, соединенным с деревом вертикальной линией. Буквы, цифра или цифры отличают один набор символов переноса от другого. Чтобы сохранить простоту аналитического дерева, символ переноса следует использовать с осторожностью
	Символ «домик». Ожидаемое событие. Иногда желательно рассмотреть различные особые случаи дерева отказов, заведомо предполагая, что одни события происходят, а другие события исключаются из рассмотрения. Когда этот символ

Продолжение таблицы 4.1

Символ события	Содержание события
	включают в дерево отказов, предполагают, что данное событие обязательно происходит, и возникает противоположная ситуация, когда его исключают. Можно также опустить причинные взаимосвязи, расположенные под знаком «И», не учитывая события, заключенного в домике и стоящего на входе этого логического знака. Подобным образом можно аннулировать связи под логическим знаком «ИЛИ», присоединив событие, заключенное в домике, непосредственно к этому знаку

На рисунке 4.2, *а*, *б* приведены примеры схем построения деревьев отказов, где символ события «круг» обозначает исходный отказ / событие отдельного элемента (в пределах данной системы или окружающей среды), который определяет таким образом разрешающую способность данного дерева отказов.

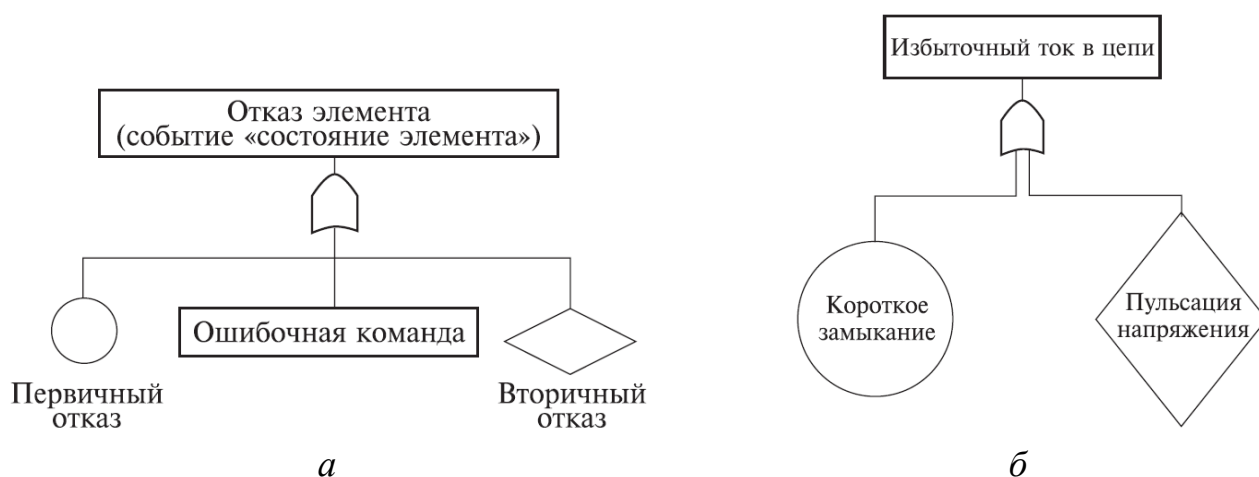


Рисунок 4.2 – Схема построения дерева отказов (*а*) и пример дерева отказов (*б*)

Символ события «ромб» используют для обозначения детально не разработанных событий в том смысле, что детальный анализ не доведен до исходных типов отказов в силу отсутствия необходимой информации, средств или времени. «Авария из-за саботажа или диверсии» является примером детально не разработанного события.

Из рисунка 4.2, *б* видно, что отказ «Избыточный ток в цепи» может быть вызван исходным событием «Короткое замыкание» или событием, не разработанным детально, – «Пулсация напряжения в цепи».

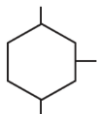
Если есть необходимость в более детальной разработке события «Пульсация напряжения в цепи», то следует использовать прямоугольник, для того чтобы показать, что событие будет разработано до более элементарного уровня.

Логические знаки связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями. Обозначения логических знаков приведены в таблице 4.2. Логический знак может иметь один или несколько входов, но только один выход или выходное событие.

Таблица 4.2 – Символы логического знака

Логический знак	Название логического знака	Причинная взаимосвязь
	«И»	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно. <i>Правило формулирования событий.</i> События, входные по отношению к операции «И», должны формулироваться так, чтобы второе было условным по отношению к первому, третье – условным по отношению к первому и второму, а последнее – условным ко всем предыдущим. Кроме того, по крайней мере одно из событий должно быть связано с появлением выходного события. <i>Правило применения логического знака «И».</i> Если имеются несколько причин, которые должны появиться одновременно, то обычно используют операцию «И». Входы операции должны отвечать на вопрос: «Что необходимо для появления выходного события?»
	«ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий. <i>Правило формулирования событий.</i> События, входные по отношению к операции «ИЛИ», должны формулироваться так, чтобы они вместе исчерпывали все возможные пути появления выходного события. Кроме того, любое из входных событий должно приводить к появлению выходного события. Правило не дает способа описания событий, но оно

Продолжение таблицы 4.2

Логический знак	Название логического знака	Причинная взаимосвязь
		должно выполняться при построении дерева отказа. <i>Правило применения логического знака «ИЛИ».</i> Если любая из причин приводит к появлению выходного события, следует использовать операцию «ИЛИ». Входы операции отвечают на вопрос: «Какие события достаточны для появления выходного события?»
	«запрет»	Наличие входа вызывает наличие выхода тогда, когда происходит условное событие. Событие, помещенное под логическим знаком «запрет» называется входным событием, в то время как событие, расположенное сбоку от логического знака, называется условным событием. Условное событие принимает форму события при условии появления входного события. Выходное событие происходит, если и входное, и условное событие имеют место. Логический знак запрета часто появляется в тех случаях, когда событие вызывается по требованию
	«приоритетное И»	Эквивалентен логическому знаку «И» с дополнительным требованием того, чтобы события на входе происходили в определенном порядке – слева направо. Появление событий на входе в другом порядке не вызывает события на выходе
	«исключающее ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается одно (но не оба) из входных событий
	«m из n» (голосования или выборки)	Имеет n событий на входе, а событие на выходе появляется, если происходят, по меньшей мере, m из n событий на входе. Выходное событие происходит, если случается m из n входных событий

Примеры использования логических знаков «И» и «ИЛИ» показаны на рисунке 4.3.

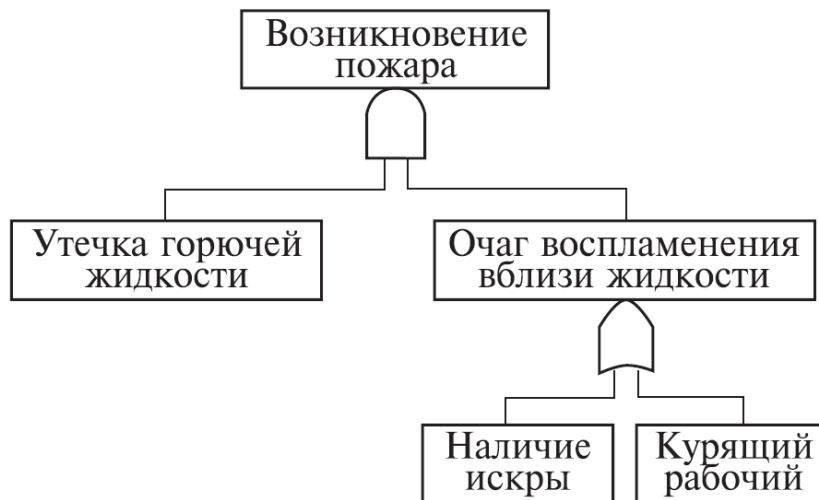


Рисунок 4.3 – Пример использования логических знаков «И» и «ИЛИ»

Событие «Возникновение пожара» имеет место, если два события «Утечка горючей жидкости» *И* «Очаг воспламенения вблизи горючей жидкости» происходят одновременно. Последнее (критическое) событие случается, если происходит одно из двух событий – «Наличие искры» *ИЛИ* «Курящий рабочий».

Причинные связи, выраженные логическими знаками «И» и «ИЛИ», являются детерминированными, так как появление выходного события полностью определяется входными событиями.

Пример использования логического знака «запрет» показан на рисунке 4.4, а. Событие «Сигнал тревоги», помещенное под логическим знаком «запрет», называется входным событием. Событие «Оператор нажал не ту кнопку по сигналу тревоги», расположенное сбоку от логического знака, называется условным событием. Условное событие принимает форму события при условии появления входного события. Выходное событие «Оператор не отключил систему» происходит, если и входное событие, и условное имеют место.

Пример замены логического знака «запрет» на логический знак «И», когда событие вызывается по требованию, показан на рисунке 4.4, б.

Пример использования логического знака «приоритетное И» показан на рисунке 4.5. Событие на выходе «Нет питания системы» появляется, если события на входе происходят в определенной последовательности (слева направо). Предполагается, что если за событием «Отказ в управлении переключателем» следует событие «Отказ основного источника», то это не

приведет к событию «Нет питания системы» при условии нормальной работы резервного источника.

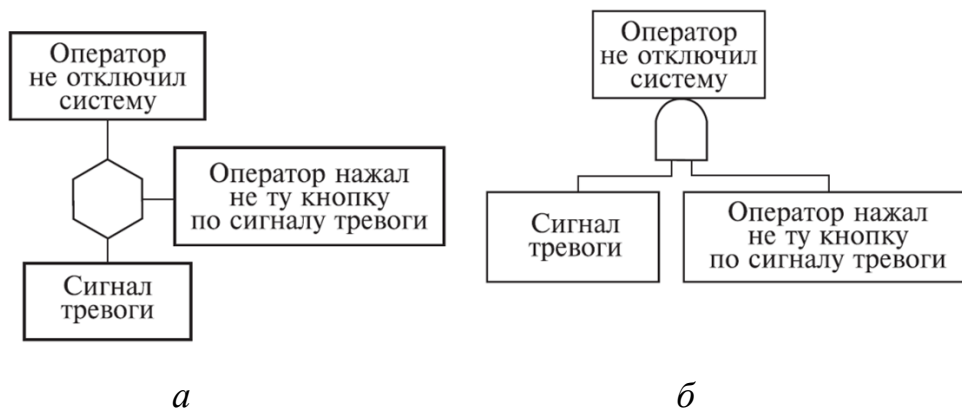


Рисунок 4.4 – Пример использования логического знака «запрет» (а) и замены его логическим знаком «И» (б)

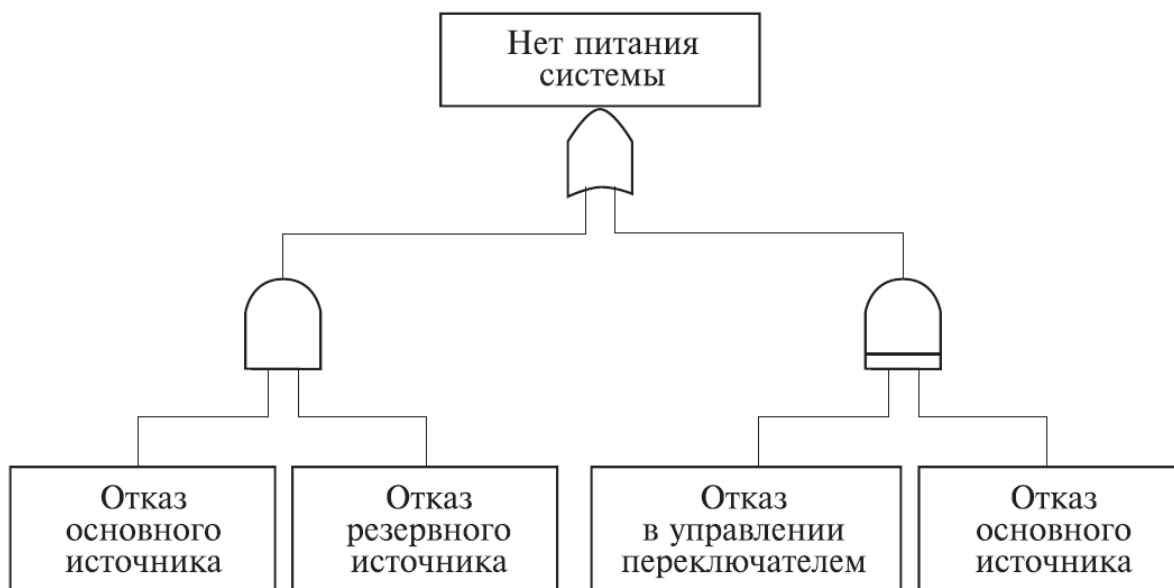


Рисунок 4.5 – Пример использования логического знака «приоритетное И»

Логический знак «приоритетное И» может быть представлен сочетанием «логического И» и знака «запрет», а следовательно, эти логические знаки являются эквивалентом «логического И». Условным событием для «логического запрета» является то, что входные события логического знака «И» происходят в определенной последовательности. Эквивалентное представление дерева, изображенного на рисунке 4.5, показано на рисунке 4.6.

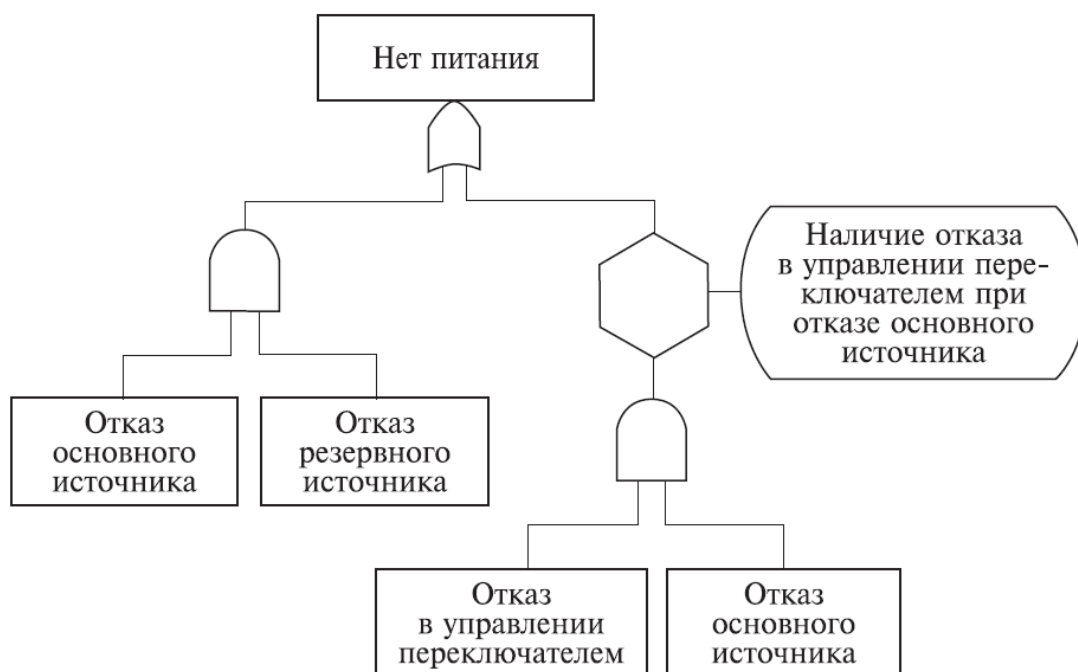


Рисунок 4.6 – Эквивалентное представление знака «приоритетное И»

Использование логического знака «исключающее ИЛИ» показано на примере системы, питающейся от двух генераторов, на рисунке 4.7. Частичная потеря мощности представлена элементом «исключающее ИЛИ». «Исключающее ИЛИ» может быть заменено комбинацией логических элементов «И» и «ИЛИ» (рисунок 4.7).

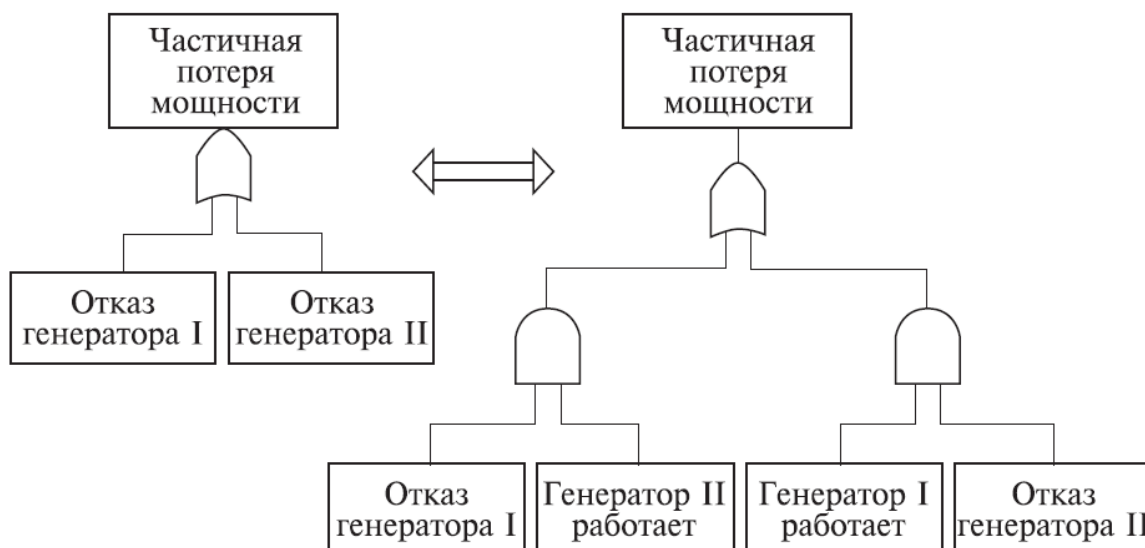


Рисунок 4.7 – Пример использования логического знака «исключающее ИЛИ» и его эквивалентное представление

Обычно в дереве отказов избегают использования работоспособных состояний, таких как «Генератор работает», так как они в значительной степени усложняют количественный анализ. Разумным подходом является замена логического знака «исключающее ИЛИ» комбинацией знаков «И» и «ИЛИ».

На рисунке 4.8 показана система выключения, состоящая из трех контрольных приборов. Предположим, что выключение системы происходит тогда и только тогда, когда два из трех контрольных приборов выдают сигнал о выключении. Таким образом, ненужное выключение системы происходит, если два или большее число контрольных приборов подадут ложный сигнал на выключение, в то время как система находится в нормальном состоянии. Эту ситуацию можно представить с помощью логического элемента «два из трех».



Рисунок 4.8 – Пример применения логического знака «два из трех»

Элемент выбора эквивалентен комбинации из логических элементов «И» и «ИЛИ», что проиллюстрировано на рисунке 4.9.

Применение логического знака «домик» показано на рисунке 4.10. Когда событие включается в рассмотрение, предполагается, что контрольный прибор I выработывает ложный сигнал. Таким образом, получаем логический знак «один из двух», т. е. простой знак «ИЛИ» с двумя входами II и III. Если событие в домике исключается из рассмотрения, получаем простой логический знак «И».

Основная структура дерева отказов:

- отказ системы или происшествия (конечного события);
- последовательности событий, которые ведут к отказам системы или происшествию;
- последовательности событий, которые строятся с помощью логических знаков «И», «ИЛИ» и др.;

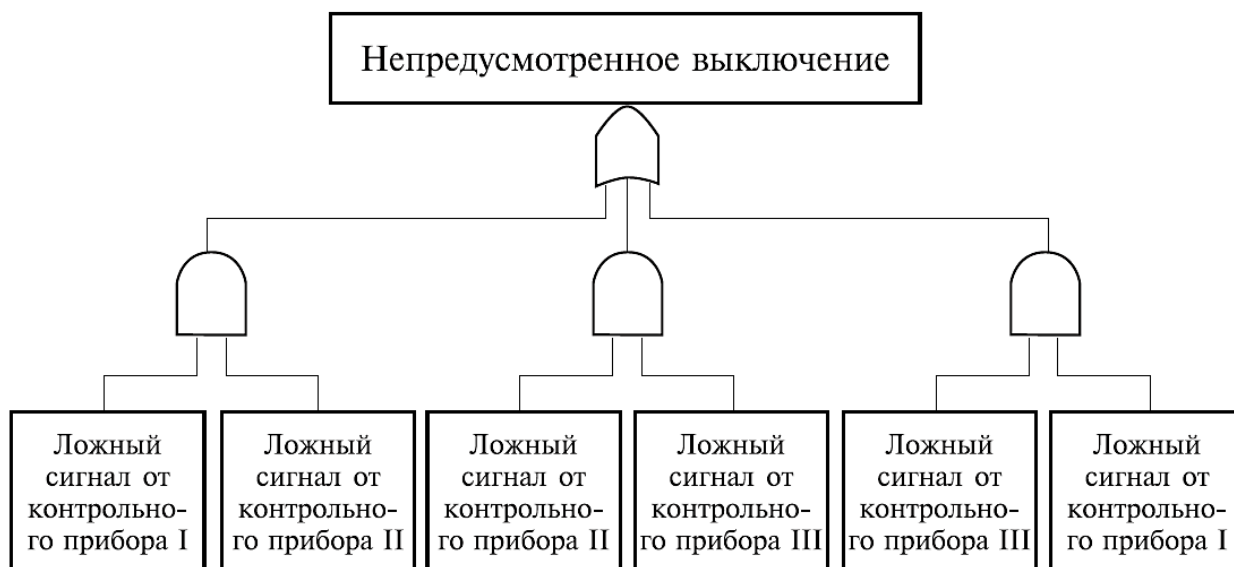


Рисунок 4.9 – Эквивалентное представление логического знака «два из трех»

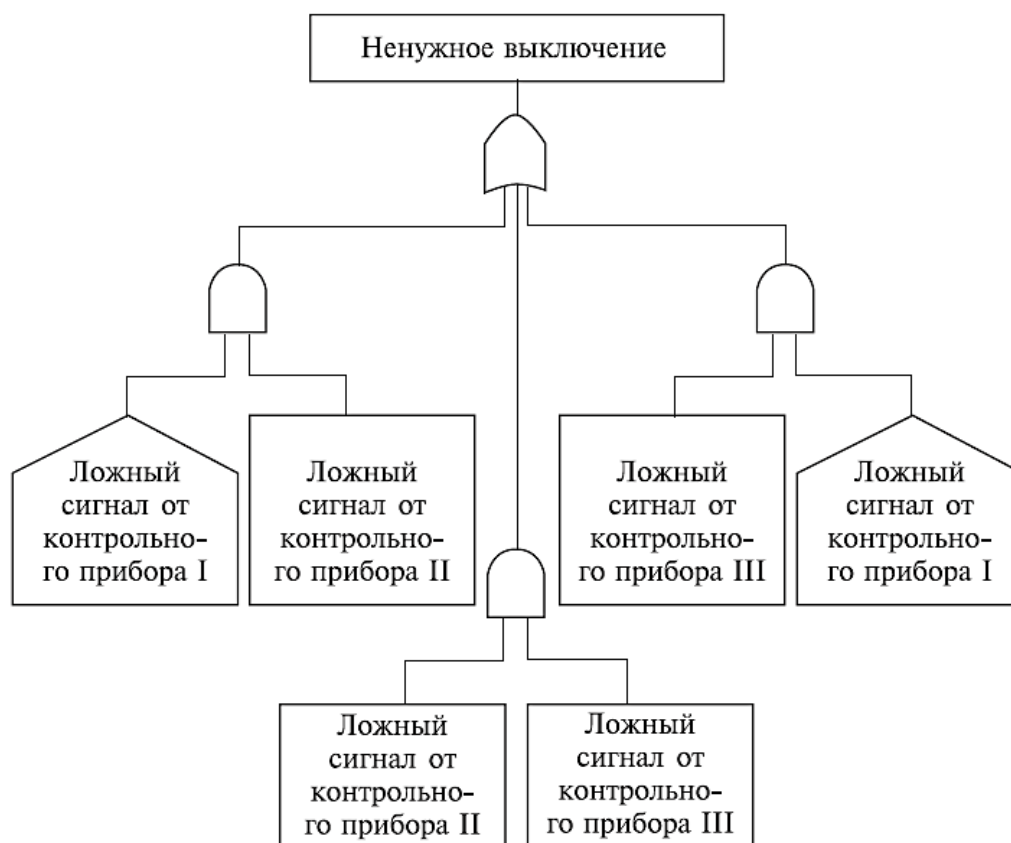


Рисунок 4.10 – Пример использования символа «домик»

– события над логическим знаком (все события, которые имеют элементарные причины отказов, помещаются в прямоугольнике, а само событие описано в этом прямоугольнике);

– последовательности, ведущие в конечном итоге к исходным причинам, для которых имеются данные по частоте отказов. Эти исходные причины обозначают кругом. Они представляют разрешающую способность данного дерева отказов.

Построение дерева отказов начинается с процессов синтеза и анализа.

В проведении синтеза можно выделить несколько стадий:

1) определяется наиболее общий уровень, на котором должны быть рассмотрены все события, являющиеся нежелательными для нормальной работы рассматриваемой системы;

2) разделяется событие на несовместные группы, причем группы формируются по некоторым общим признакам, например по одинаковым причинам возникновения;

3) на основе общих признаков выделяется одно событие, к которому приводят все события каждой группы. Выделенное событие является головным и рассматривается с помощью отдельного дерева отказов.

В проведении анализа также можно выделить несколько стадий:

1) определяется головное событие, которое образует вершину дерева;

2) определяются все первичные и вторичные события, которые могут вызвать головное событие;

3) определяются отношения между вызывающими и головными событиями в терминах логических операций «И» и «ИЛИ». При этом логический знак может иметь один или несколько входов, но только один выход, или выходное событие. Выходное событие логического знака «И» наступает в том случае, если все входные события появляются одновременно. С другой стороны, выходное событие у логического знака «ИЛИ» происходит, если имеет место любое из входных событий. Для любого события, подлежащего дальнейшему анализу, вначале рассматриваются все события, являющиеся входами операции «ИЛИ», а затем входы операции «И». Это правило справедливо как для головного события, так и для любого события, анализ которого целесообразно продолжать. Следует отметить, что выполнение данного правила необходимо для изучения исходных данных и вероятностного анализа;

4) определяются величины, необходимые для дальнейшего анализа каждого из событий на стадиях 2 и 3. Для каждого вызывающего события, которое уточняется далее, повторяются стадии 2 и 3, причем термин «головное

событие» в этом случае относится к данному событию – причине, которую продолжаем анализировать;

5) продолжаются стадии 2–4, пока либо все события не выразятся через основные события, либо анализ дальше прекращается дробиться в силу незначительности событий, отсутствия данных и т. п.;

6) представляются события в виде диаграммы, используя стандартные символы событий и логические символы;

7) выполняется качественный и количественный анализ. Основным принципиальным моментом при анализе оказывается выделение общих признаков. Другими важными факторами, которые должны учитываться при количественных методах, являются возможные результаты последствий, связанных с головным событием. Разные головные события требуют различные степени внимания в зависимости от последствий.

Обычно для каждой системы строят несколько деревьев отказов. Впоследствии они могут быть связаны, но на этапе построения с ними работают отдельно. Аналогично, если система функционирует в различных режимах, то может понадобиться анализ деревьев отказов для каждого из них.

Ценность дерева отказов заключается в следующем:

- анализ ориентируется на нахождение отказов;
- позволяет показать в явном виде ненадежные места;
- обеспечивается графикой и представляет наглядный материал для той части работников, которые принимают участие в обслуживании системы;
- дает возможность выполнения качественного или количественного анализа надежности системы;
- позволяет специалистам поочередно сосредотачиваться на отдельных конкретных отказах системы;
- обеспечивает глубокое представление о поведении системы и проникновение в процесс ее работы;
- является средством общения специалистов, поскольку отказы представлены в четкой наглядной форме;
- помогает дедуктивно выявлять отказы;
- дает конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений или установления степени соответствия конструкции системы заданным требованиям и анализа компромиссных решений;
- облегчает анализ надежности сложных систем.

Главное преимущество дерева отказов (по сравнению с другими методами) заключается в том, что анализ ограничивается выявлением только тех элементов системы и событий, которые приводят к данному конкретному отказу системы или аварии.

Недостатки дерева отказов состоят в следующем:

- реализация метода требует значительных затрат средств и времени;
- дерево отказов представляет собой схему булевой логики, на которой показывают только два состояния: рабочее и отказовое;
- трудно учесть состояние частичного отказа элементов, поскольку при использовании метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа;
- трудности в общем случае аналитического решения для деревьев, содержащих резервные узлы и восстанавливаемые узлы с приоритетами, не говоря уже о тех значительных усилиях, которые требуются для охвата всех видов множественных отказов;
- требует от специалистов по надежности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа;
- дерево отказов описывает систему в определенный момент времени (обычно в установившемся режиме), и последовательности событий могут быть показаны с большим трудом, иногда это оказывается невозможным. Это справедливо для систем, имеющих сложные контуры регулирования.

Для статистически независимых событий при логической схеме «ИЛИ» вероятность появления завершающего, выходного события в общем случае имеет вид

$$P_0 = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i), \quad (4.2)$$

где P_0 – вероятность реализации выходного события;

n – число входов;

P_i – вероятность появления i -го входного события.

Например, для статистически независимых входных событий «А» и «Б» при логической схеме «ИЛИ» (рисунок 4.11) вероятность появления выходного события «Г» равна $P_{\Gamma} = 1 - (1 - P_A)(1 - P_B)$.

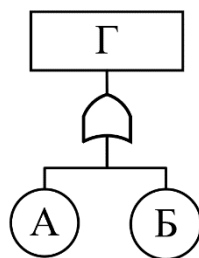


Рисунок 4.11 – Независимые события «А» и «Б» при логической схеме «ИЛИ»

В случае схемы «И» для n статистически независимых входных событий вероятность появления выходного события определяется по формуле

$$P_0 = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (4.3)$$

Например, для статистически независимых входных событий «А» и «Б» при логической схеме «И» (рисунок 4.12) вероятность появления выходного события «Г» равна $P_0 = P_A \cdot P_B$.

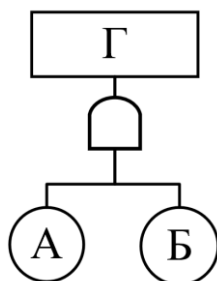


Рисунок 4.12 – Независимые события «А» и «Б» при логической схеме «И»

Таким образом, используя соотношения (4.2) и (4.3), можно вычислить вероятность наступления головного события, исходя из имеющейся вероятности первичных событий.

Для определения последовательности событий при аварии, включающей сложные взаимодействия между составными частями технической системы, используют дерево событий.

Метод построения дерева событий – это графический способ слежения за набором обстоятельств (отказа системы и внешних воздействий на нее), ведущих к неблагоприятному исходу. Дерево событий рассматривает возможные пути

развития последствий аварии (сценарии развития событий). Все события, которые могут произойти после произошедшего инцидента, соединены причинно-следственными связями в зависимости от срабатывания или отказа элементов защиты системы.

Ствол дерева располагается в левой части рисунка. Стволом дерева является инцидент, т. е. само неблагоприятное событие. Из ствола дерева отстраиваются ветви. Ветвями дерева являются возможные пути развития последствий инцидента.

В каждой технической системе есть способы, устройства, приспособления, предохраняющие систему от аварий и катастроф. Они называются элементами защиты системы. Звенья, или элементы, защиты системы могут сработать или не сработать. Верхние ветви дерева отражают развитие событий при срабатывании элемента защиты и называются *ветвями срабатывания*. Нижние ветви дерева событий называются *ветвями отказов*. В более общем случае элементы защиты могут функционировать независимо друг от друга. Вне зависимости от того, сработал ли какой-либо элемент защиты системы, другой может также сработать либо отказать.

Анализ при помощи дерева событий обычно включает в себя:

- определение первого события. Выбирается ситуация, которая может повлечь за собой событие с дальнейшим его развитием. Развитие ситуации рассматривается поэтапно с учетом места ее возникновения, уровня потенциальной опасности и возможности ее локализации и ликвидации;

- переход с рассматриваемой стадии на новую. Определяется возможностью либо локализации ситуации на рассматриваемой стадии, либо развития ситуации, связанной с вовлечением других элементов системы в результате влияния на них опасных факторов события, возникших на рассматриваемой стадии;

- переход со стадии на стадию. Как правило, отображается в виде соединяющих линий со стрелками, указывающими направления развития ситуации и последующего события;

- установленный для каждой стадии уровень опасности, т. е. рекомендуется указывать вероятность возникновения события.

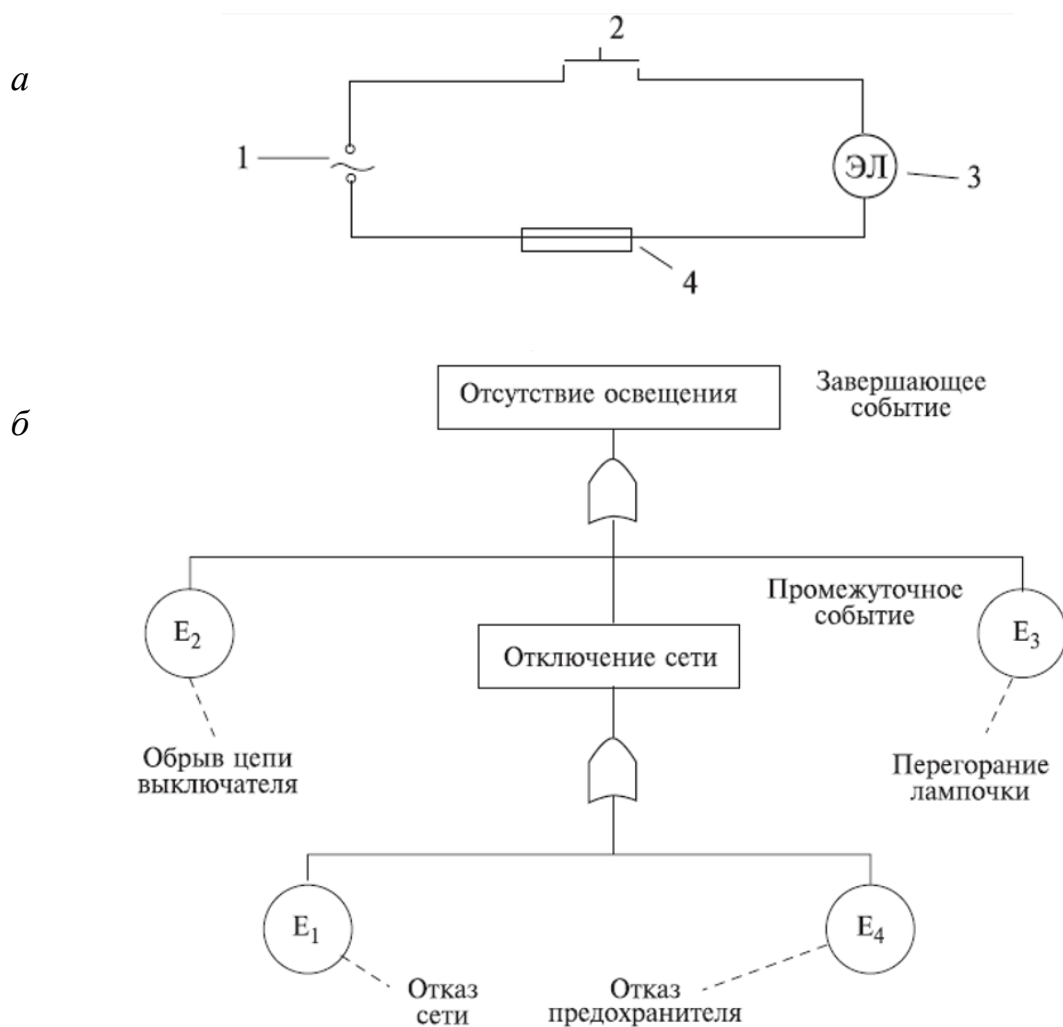
Каждый пункт древа представляет собой возможное событие, а вложенные в него подпункты – действия или решения, которые должны быть выполнены для обеспечения безопасности при возникновении рассматриваемого события. Логическое древо событий помогает предугадать возможные последствия и разработать соответствующие планы действий. Таким образом, *логическое древо событий* представляет собой иерархическую структуру, которая содержит

последовательность возможных событий и действий в случае возникновения рассматриваемого события. Оно используется для систематизации и структурирования информации, а также для планирования и проведения мероприятий по обеспечению безопасности.

Пример решения задач

Задача 4.1. Построить дерево отказов для системы «сеть – выключатель – электрическая лампочка». Рассчитать вероятность отказа системы.

Решение. Отказ выключателя состоит лишь в том, что он не замыкается, а завершающим событием является отсутствие освещения. Электрическая схема и дерево отказов для этой системы показаны на рисунке 4.13, а, б.



1 – сеть; 2 – выключатель; 3 – электролампа; 4 – предохранитель

Рисунок 4.13 – Электрическая схема системы «сеть – выключатель – электрическая лампочка» (а) и дерево (б) для случая первичных отказов

Основными (первичными) событиями дерева отказов являются: отказ источника питания $E_1(P_{E1} = 0,032)$, отказ предохранителя $E_4(P_{E4} = 0,014)$, отказ выключателя $E_2(P_{E2} = 0,044)$ и перегорание лампочки $E_3(P_{E3} = 0,068)$.

Промежуточным событием является прекращение подачи энергии. Исходные отказы представляют собой входы схем «ИЛИ»: при наступлении любого из четырех первичных событий осуществляется завершающее событие – отсутствие освещения.

Вероятность отключения сети составит

$$P_{\text{откл.сети}} = 1 - (1 - P_{E1})(1 - P_{E4}) = 1 - (1 - 0,032)(1 - 0,014) = 0,046.$$

Вероятность отсутствия освещения составит

$$\begin{aligned} P_{\text{отс.освещ}} &= 1 - (1 - P_{E2})(1 - P_{E3})(1 - P_{\text{откл.сети}}) = \\ &= 1 - (1 - 0,044)(1 - 0,068)(1 - 0,046) = 0,150. \end{aligned}$$

В случае вторичного отказа требуется более глубокое исследование системы. При этом анализ выходит за рамки рассмотрения системы на уровне отказов ее основных элементов, поскольку вторичные отказы вызываются неблагоприятным воздействием окружающих условий или чрезмерными нагрузками на элемент системы в процессе ее эксплуатации.

Задача 4.2. Построить дерево событий при разрушении трубопровода холодильной установки системы охлаждения реактора.

Решение. Предположим, путем выполнения предварительного анализа опасностей выявлено, что критической частью реактора, т. е. подсистемой, с которой начинается риск, является система охлаждения реактора. Таким образом, анализ начинается с просмотра последовательности возможных событий с момента разрушения трубопровода холодильной установки, называемого инициирующим событием, вероятность которого равна P_A (рисунок 4.14), т. е. авария начинается с разрушения (поломки) трубопровода – событие A . Далее анализируются возможные варианты развития событий (B , C , D и E), которые могут последовать за разрушением трубопровода. На рисунке 4.14 изображено дерево исходных событий, отображающее все возможные альтернативы. На первой ветви рассматривается состояние электрического питания. Если питание есть, следующей подвергается анализу аварийная система охлаждения активной зоны реактора (АСОР). Отказ АСОР

приводит к расплавлению топлива и к различным, в зависимости от целостности конструкции, утечкам радиоактивных продуктов.

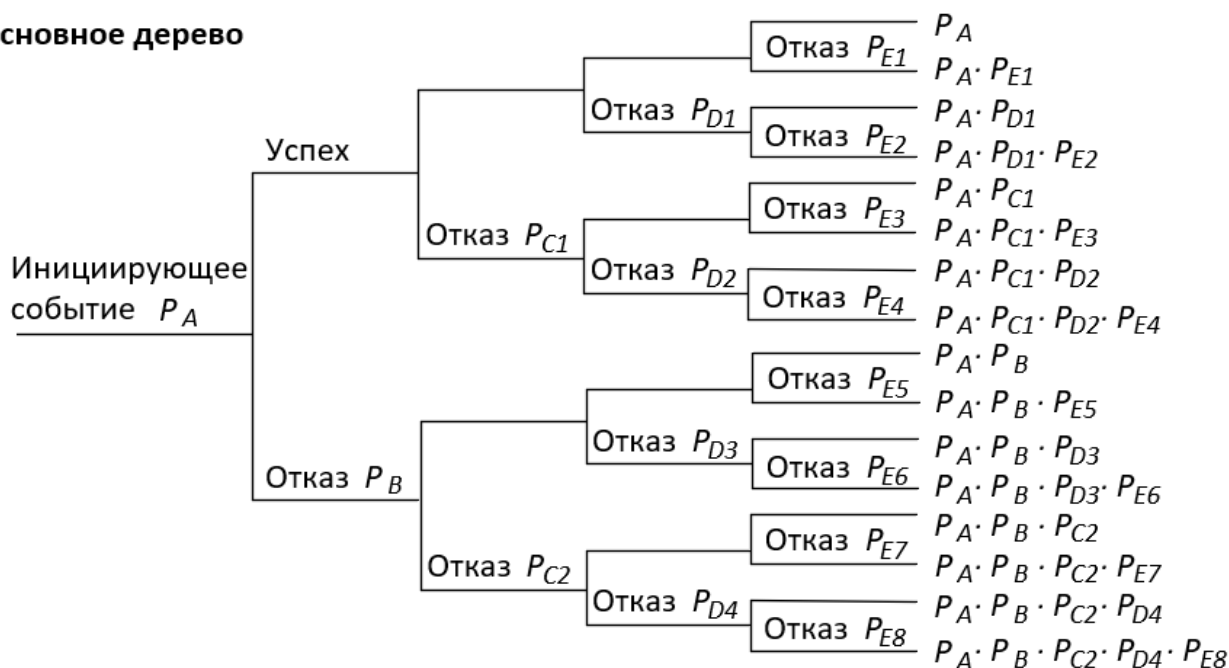
Для анализа с использованием двоичной системы, в которой элементы либо выполняют свои функции, либо отказывают, число потенциальных отказов равно 2^{N-1} , где N – число рассматриваемых элементов. На практике исходное дерево можно упростить с помощью инженерной логики и свести к более простому дереву, изображенному в нижней части рисунка 4.14. Рассмотрим вопрос о наличии электрического питания. Какова вероятность отказа электропитания P_B и какое действие этот отказ оказывает на другие системы защиты? Если нет электрического питания, фактически никакие действия, предусмотренные на случай аварии, с использованием распылителей для охлаждения активной зоны реактора, не могут производиться. В результате упрощенное дерево событий не содержит выбора в случае отсутствия электрического питания, и может произойти большая утечка, вероятность которой равна $P_A \cdot P_B$. В случае если отказ в подаче электрической энергии зависит от поломки трубопровода системы охлаждения реактора, вероятность P_B следует подсчитывать как условную вероятность для учета этой зависимости.

Если электрическое питание имеется, следующие варианты при анализе зависят от состояния АСОП. Она может работать или не работать, и ее отказ с вероятностью P_{C1} ведет к последовательности событий, изображенной на рисунке 4.14. Следует обратить внимание на то, что по-прежнему имеются различные варианты развития аварии.

Если система удаления радиоактивных материалов работоспособна, радиоактивные утечки меньше, чем в случае ее отказа. Конечно, отказ в общем случае ведет к последовательности событий E с меньшей вероятностью, чем в случае работоспособности. Рассмотрев все варианты дерева, можно получить спектр возможных утечек и соответствующие вероятности для различных последовательностей событий развития аварии. Верхняя линия дерева является основным сценарием рассмотрения событий при разрушении трубопровода холодильной установки системы охлаждения реактора. Остальные ветки дерева с отказами систем демонстрируют запроектные аварии, где последствия тяжелее, но вероятность их реализации ниже. При данной последовательности предполагается, что трубопровод разрушается, а все системы обеспечения безопасности сохраняют работоспособность.

A	B	C	D	E
Поломка трубо- провода	Электро- питание	АСОР	Удаление радио- активных продуктов	Целост- ность замкну- того контура

Основное дерево



A	B	C	D	E
Поломка трубо- провода	Электро- питание	АСОР	Удаление радио- активных продуктов	Целост- ность замкну- того контура

Упрощенное дерево

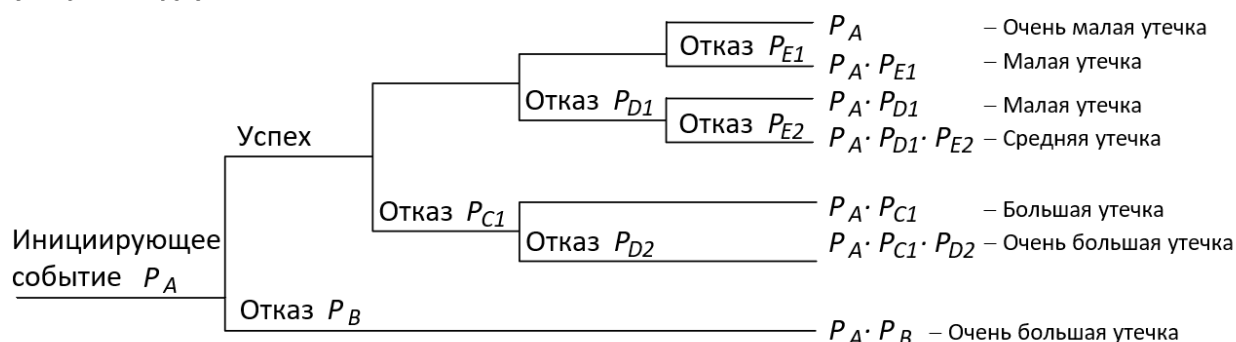


Рисунок 4.14 – Дерево событий

Задачи для самостоятельной работы

Задача 4.1. Построить дерево отказов для системы. Начальное событие для системы студент определяет самостоятельно. При построении дерева рассмотреть учесть все виды отказов: первичные, вторичный, ошибочные команды. Варианты заданий представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Исходные данные к задаче 4.1

Вариант	Система	Вариант	Система
1	Системный блок	16	Система пожаротушения
2	Монитор	17	Механические часы
3	Мобильный телефон	18	Моноблок
4	Принтер	19	Смарт-телевизор
5	Сканер	20	Электронная книга
6	3D-принтер	21	Тонометр
7	Компрессор	22	Электросамокат
8	Умные часы	23	Студийный микрофон
9	Умная колонка	24	Цифровой фотоаппарат
10	Робот-пылесос	25	Графический планшет
11	Компьютерная мышь	26	Портативный проектор
12	Маршрутизатор	27	Роутер
13	Кондиционер	28	Электроплита
14	Беспроводные наушники	29	Холодильник
15	Система видеонаблюдения	30	Калькулятор

Задача 4.2. Построить дерево событий для системы, рассматриваемой в задаче 4.1. За инициирующее событие взять поломку элемента системы.

Содержание отчета

- 1 Титульный лист.
- 2 Исходные данные в соответствии с вариантом.
- 3 Ход выполнения работы.
- 4 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое дерево отказов?
- 2 Что такое событие и какие события бывают?
- 3 Что такое отказ и какие отказы бывают?

- 4 С чего начинается построение дерева отказов?
- 5 В чем заключается ценность дерева отказов?
- 6 В чем заключаются недостатки дерева отказов?
- 7 Какие символы логического знака используют при построении дерева отказов? Каково их назначение?
- 8 Что такое дерево событий?
- 9 С чего начинается построение дерева событий?
- 10 Какие символы логического знака используют при построении дерева событий? Каково их назначение?

Список использованных источников

- 1 Белов, П. Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование : учеб. и практикум : в 3 ч. Ч. 2 / П. Г. Белов. – М. : Юрайт, 2022. – 250 с.
- 2 СТБ 1506-2021 Системы менеджмента. Анализ рисков. Анализ видов и последствий отказов. – Введ. 2022–08–01. – Минск : БелГИСС, 2022. – 262 с.
- 3 СТБ ИЕС 31010-2022 Менеджмент риска. Техники оценки риска. – Введ. 2023–08–01. – Минск : БелГИСС, 2023. – 124 с.
- 4 СТБ МЭК 60300-3-9-2005 Управление надежностью. Анализ риска технологических систем. – Введ. 2005–09–01. – Минск : БелГИСС, 2005. – 28 с.
- 5 Щербина, Н. В. Основы промышленной безопасности : учеб.-метод. пособие / Н. В. Щербина, В. С. Осипович, К. Д. Яшин. – Минск : БГУИР, 2016. – 95 с.

Тема 5. Расчет предельно-допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников

Цель: формирование у студентов знаний и навыков прогнозирования загрязнения воздушной среды от стационарных источников; определение необходимости использования защитных мер.

План занятия

- 1 Изучить теорию.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.
- 4 Оформить отчет.

Теоретические сведения

Защита атмосферного воздуха от загрязнений вредными веществами является одной из главных задач в охране окружающей среды. Источниками химического загрязнения атмосферы являются промышленные предприятия, транспортные средства и энергетические объекты, работающие на органическом топливе, утилизация отходов сжиганием. Важным мероприятием по защите атмосферы могут стать высокоэффективные пылегазоулавливающие установки, снижающие концентрацию вредных примесей в выбросах предприятий.

Выбросы в атмосферу подразделяются по следующим основным признакам:

- 1) по виду источников;
- 2) по температуре выбрасываемой пылегазовоздушной смеси;
- 3) по высоте и форме выбросного устройства.

По виду источники бывают технологические и вентиляционные. К технологическим относятся трубы теплоэлектростанций и котельных, продувка технологического оборудования, выхлопы двигателей внутреннего сгорания, местные отсосы от постов окраски, сварки, пайки, гальванических ванн. Эти источники характеризуются высокими концентрациями загрязняющих веществ в выбрасываемой смеси. К вентиляционным источникам относятся системы общеобменной вентиляции помещений. Эти источники при малых концентрациях вредных веществ в выбросах характеризуются большими объемами воздуха, загрязненного в помещениях и выбрасываемого в атмосферу.

По температуре пылегазовоздушные смеси бывают:

- *холодные*, когда температура пылегазовоздушной смеси $T_{\text{см}}$ и температура наружной атмосферы $T_{\text{н}}$ одинаковы или $T_{\text{см}} < T_{\text{н}}$;
- *нагретые*, когда $\Delta T = T_{\text{см}} - T_{\text{н}} > 0$.

Форма выбросных устройств может быть в виде труб (точечные источники) и аэрационных фонарей – вытянутых вдоль всей длины здания застекленных надстроек на крыше, через открываемые проемы в которых воздух из помещения поступает в атмосферу (линейные источники). По высоте расположения над земной поверхностью выбросные устройства бывают низкие и высокие. К низким относятся источники (точечные, линейные), вредные выбросы которых загрязняют наветренную и заветренную циркуляционные зоны широкого здания, единую циркуляционную зону узкого здания или межкорпусную циркуляционную зону двух смежных зданий. От высоких источников факел выброса распространяется в атмосфере вне циркуляционных зон.

При обтекании ветром промышленных зданий возникают замкнутые, плохо проветриваемые циркуляционные зоны, размеры которых следует учитывать при расчетах рассеивания вредных веществ на территории промышленных площадок:

- при обтекании ветром узкого здания возникает единая циркуляционная зона, которая распространяется от заветренной стены здания на расстояние $6H_{\text{зд}}$. Высота этой зоны в среднем составляет $1,8H_{\text{зд}}$ от поверхности земли (рисунок 5.1);

- при обтекании ветром широкого здания над ним возникает наветренная циркуляционная зона длиной $2,5H_{\text{зд}}$ и высотой от поверхности земли $1,8H_{\text{зд}}$. За зданием возникает заветренная циркуляционная зона длиной $4H_{\text{зд}}$ и высотой около $H_{\text{зд}}$ (рисунок 5.2);

- между двумя параллельно установленными зданиями возникает единая межкорпусная циркуляционная зона длиной до $10H_{\text{зд}}$, если первое по потоку здание узкое (рисунок 5.3, а), и до $8H_{\text{зд}}$, если первое по потоку здание широкое (рисунок 5.3, б).

Смежными считаются два параллельно расположенных здания с расстоянием между ними x_1 не более $8H_{\text{зд}}$, если первое здание по потоку широкое (рисунок 5.3, а), и не более $10H_{\text{зд}}$, если оно узкое (рисунок 5.3, б). Здания рассматриваются как отдельно стоящие при больших расстояниях между ними.

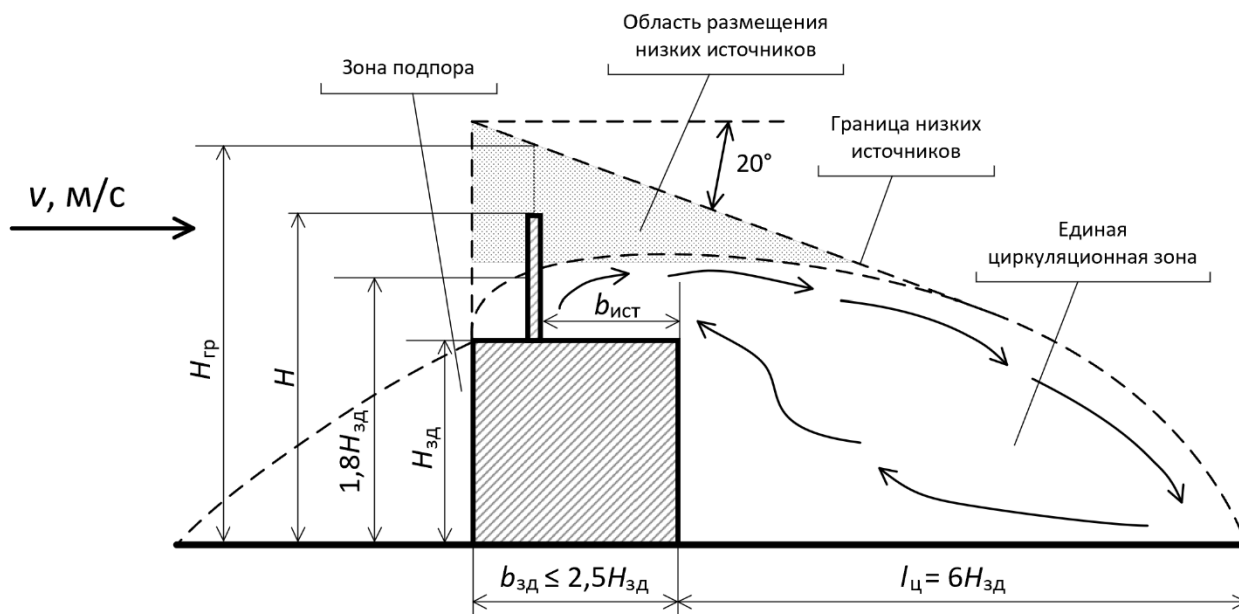


Рисунок 5.1 – Размер циркуляционной зоны, возникающей при обтекании воздушным потоком узкого отдельно стоящего здания, и область (заштрихована) расположения устья низкого источника

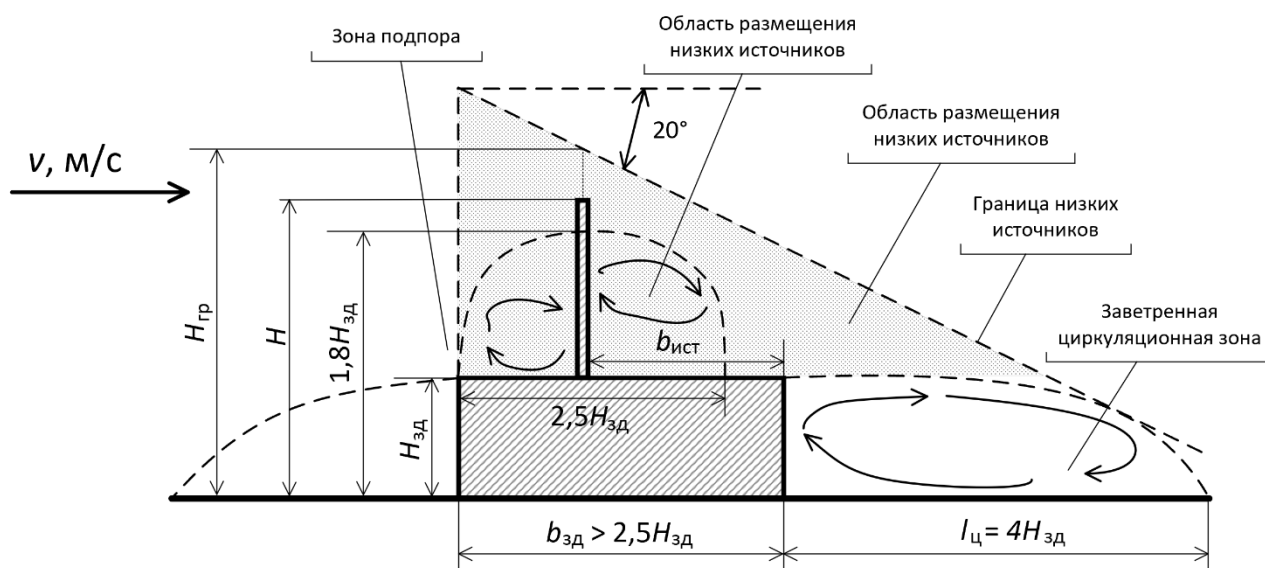


Рисунок 5.2 – Размер циркуляционной зоны, возникающей при обтекании воздушным потоком широкого отдельно стоящего здания, и область (заштрихована) расположения устья низкого источника

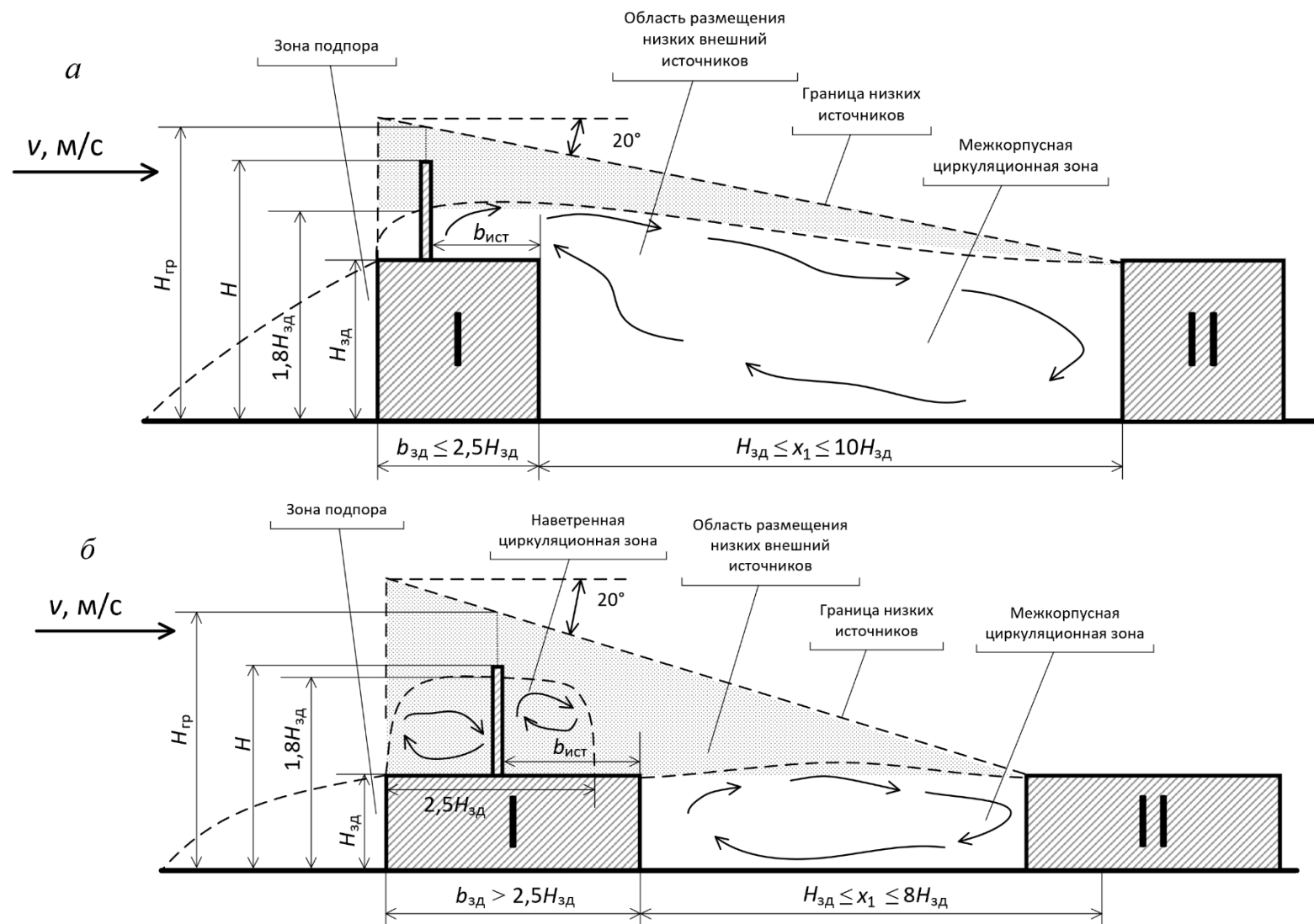


Рисунок 5.3 – Размеры циркуляционных зон, возникающих при обтекании воздушным потоком группы зданий, и область расположения устьев низких источников: с первым по потоку узким (а); с широким (б) зданием

Источники, из которых вредные вещества выбрасываются на высоте, равной или превышающей границу низких выбросов $H_{гр}$ для рассматриваемой циркуляционной зоны, и не поступают в зоны, указанные на рисунках 5.1–5.3, следует относить к высоким.

Критерием загрязненности воздушной среды, возникающей при вентиляционных и технологических выбросах, являются создаваемые ими концентрации вредных веществ C в контролируемых зонах на территории промышленной площадки предприятия и (или) жилой застройки. При превышении предельно допустимых концентраций (ПДК) для выбрасываемых веществ уровень загрязненности атмосферного воздуха является опасным для здоровья людей и требует специальных мер по ограничению количества вредного вещества (M , г/с или мг/с), выбрасываемого в атмосферу. Количество вредного вещества M в этом случае должно быть снижено до величины, называемой предельно допустимым выбросом.

Предельно допустимый выброс (ПДВ) – это такое количество i -го вредного вещества, поступающее в атмосферу от источника выброса, при котором максимальное значение $C_{max i}$, возникающее при действии источника, не превышает предельно допустимых уровней, т. е.

$$C_{max i} \leq ПДК_i. \quad (5.1)$$

При этом за *критерий экономически допустимого уровня загрязненности воздуха* принята величина максимальной разовой ПДК для населенных мест ($ПДК_{макс.р}$) и $0,3ПДК_{р.з}$ для территорий промплощадки, где $ПДК_{р.з}$ – это допустимое содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны производственных помещений.

ПДК вредных веществ (наиболее используемых и образующихся в радиоэлектронном производстве) в атмосферном воздухе для населенных мест и в воздухе рабочей зоны приведены в таблице 5.1.

Для большинства выбросов характерен сложный, многокомпонентный состав загрязнителей в пылегазовоздушной смеси. Соотношение (5.1) справедливо при наличии в воздушной среде одного или нескольких вредных веществ неоднаправленного действия. Если совместно присутствующие вещества сходны по химическому строению или характеру биологического действия на организм человека, их вредное влияние на здоровье суммируется, и поэтому они относятся к группе *однаправленных*. Эффектом суммации действия обладают следующие сочетания вредных веществ: а) ацетон и фенол; б) озон, двуокись азота и формальдегид; в) сернистый газ, фенол, двуокись азота;

г) сернистый газ и сероводород; д) сильные минеральные кислоты (серная, соляная и азотная) и щелочи; е) серный и сернистый ангидрид, аммиак, окислы азота; ж) ароматические углеводороды (толуол и ксилол).

Таблица 5.1 – Предельно допустимая концентрация вредных веществ в атмосферном воздухе для населенных мест и в воздухе рабочей зоны

Вещества	Агрегатное состояние	Предельно допустимые концентрации веществ, мг/м ³		
		В воздухе рабочей зоны (ПДК _{р.з.})	В атмосферном воздухе населенных пунктов	
			Максимальная разовая (ПДК _{макс.р.})	Среднесуточная (ПДК _{ср.сут.})
Азота окислы (в пересчете на NO ₂)	п	5	0,085	0,085
Акролеин	п	0,7	0,03	0,03
Ацетон	п	200	0,35	0,35
Бензин-растворитель (в пересчете на С)	п	300	5	1,5
Дихлорэтан	п	10 ⁺	3	1
Ангидрит сернистый	п	10	0,5	0,05
Серный ангидрит	п	1	—	—
Ксилол	п	50	0,2	0,2
Марганец и его соединения (в пересчете на MnO ₂)	а	0,3	—	0,01
Озон	п	0,1	0,16	0,03
Оксись углеродная	п	20	3	1
Свинец и его неорганические соединения	а	0,01	—	0,0003
Серная кислота	п	1	0,3	0,1
Сероводород	п	10 ⁺	0,008	0,008
Соляная кислота	п	5	0,2	0,2
Толуол	п	50	0,6	0,6
Фенол	п	5 ⁺	0,01	0,01
Формальдегид	а	0,5	0,036	0,03
Хромовый ангидрид, хроматы, бихроматы (в пересчете на CrO ₃)	а	0,01	0,0015	0,0015
Цианистый водород, соли синильной кислоты (в пересчете на HCN)	п	0,3 ⁺	—	0,01
Эпихлоргидрид	п	1	0,2	0,2

Примечание – В таблице 5.1 приведены преимущественные агрегатные состояния веществ, выбрасываемых производственным оборудованием: п – пары и (или) газы; а – аэрозоли.

При совместном присутствии в атмосфере n веществ одностороннего действия безвредность воздушной среды определяется выполнением условия

$$\frac{C_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{C_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{C_n}{\text{ПДК}_n} \leq 1, \quad (5.2)$$

где $C_1, C_2, \dots, C_n$, – фактические концентрации вредных веществ в воздухе;

$\text{ПДК}_1, \text{ПДК}_2, \dots, \text{ПДК}_n$ – предельно допустимые концентрации этих веществ.

Определение ПДВ для предприятий проводится на основе следующих данных:

1 Габариты и размещение производственных зданий на плане предприятия, размеры промплощадки и расстояние от источников выброса до жилых застроек.

2 Географическое положение рассматриваемых объектов выброса и окружающей территории, преобладающие скорости и направления ветров для данной местности, фоновое загрязнение воздушных потоков.

3 Состав пылегазовоздушной смеси и условия ее поступления в атмосферу – высота выбросного отверстия и его расположение на здании, сечение трубы или другой конструкции выбросного отверстия, скорость выхода пылегазовоздушной смеси и ее температура.

4 Местонахождение расчетной точки в контролируемой зоне, где необходимо обеспечить допустимое содержание вредных веществ в воздухе. Положение этой точки определяется ее расстоянием x_1 от источника выброса, а в случае, если это точка не лежит на оси факела рассеивания вредности, также и от кратчайшего расстояния от этой точки до оси факела.

Последовательность расчета ПДВ:

1 Определить валовый выброс M_i каждого вредного вещества, поступающего из источника в атмосферу:

$$M_i = C_{0i} \cdot L, \text{ мг/с}, \quad (5.3)$$

где C_{0i} – концентрация загрязняющего вещества в выбросном отверстии, мг/м³;

L – объем пылегазовоздушной смеси, выбрасываемой источником выброса, м³/с.

Объем пылегазовоздушной смеси L , выбрасываемой источником выброса, определяется по формуле

$$L = S_0 \cdot v_{\text{ПГВ}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5.4)$$

где S_0 – сечение выбросного отверстия, м^2 ; для труб $S_0 = \pi D^2/4$, м^2 , где D – диаметр трубы;

$v_{\text{ПГВ}}$ – скорость выхода пылегазовоздушной смеси через выбросное отверстие в атмосферу, $\text{м}/\text{с}$.

2 С учетом высоты здания $H_{\text{зд}}$ и его ширины $b_{\text{зд}}$ по формулам (5.5) и (5.6) определить категорию здания: узкое или широкое.

Размеры циркуляционных зон зданий ($l_{\text{ц}}, x_1$) определяются высотой здания $H_{\text{зд}}$ и его шириной $b_{\text{зд}}$ (см. рисунки 5.1–5.3). Здание относится к следующим категориям при выполнении соответствующих условий:

– здание относится к узкому при условии:

$$b_{\text{зд}} \leq 2,5H_{\text{зд}}; \quad (5.5)$$

– здание относится к широкому при условии:

$$b_{\text{зд}} > 2,5H_{\text{зд}}; \quad (5.6)$$

– здание относится к длинному при условии:

$$l_{\text{зд}} > 10H_{\text{зд}}; \quad (5.7)$$

– здание относится к короткому при условии:

$$l_{\text{зд}} \leq 10H_{\text{зд}}. \quad (5.8)$$

3 Рассчитать граничную высоту источника выброса $H_{\text{гр}}$ по формулам (5.9)–(5.11) и определить высотную категорию источника выброса.

Граничная высота источника выброса (см. рисунки 5.1–5.3) $H_{\text{гр}}$, м, при его размещении на крыше определяется по формулам:

– для узкого отдельно стоящего здания (см. рисунок 5.1):

$$H_{\text{гр}} = 0,36b_{\text{ист}} + 2,5H_{\text{зд}}, \text{ м}; \quad (5.9)$$

– для широкого отдельно стоящего здания (см. рисунок 5.2):

$$H_{\text{гр}} = 0,36b_{\text{ист}} + 1,7H_{\text{зд}}, \text{ м}; \quad (5.10)$$

– для группы зданий (см. рисунок 5.3):

$$H_{\text{гр}} = 0,36(b_{\text{ист}} + x_1) + H_{\text{зд}}, \text{ м}, \quad (5.11)$$

где $b_{\text{ист}}$ – расстояние от источника, расположенного в пределах крыши, до заветренной стены здания. Источники, выбрасывающие вредные вещества на высоте, превышающей $H_{\text{гр}}$, не загрязняют циркуляционные зоны над и за зданием.

Источник выброса пылегазовоздушной смеси H относится к высокому при выполнении условия

$$H > H_{\text{гр}}. \quad (5.12)$$

Источник выброса пылегазовоздушной смеси H относится к низкому при выполнении условия

$$H \leq H_{\text{гр}}. \quad (5.13)$$

4 При наличии вредных веществ в вентиляционно-технологическом выбросе установить для пылегазовоздушной смеси доминирующее вещество, по отношению к которому необходимо рассчитать ожидаемый уровень загрязнения воздуха и, при необходимости, величину ПДВ. Доминирующим считается i -е вещество, для которого показатель Π_{gi} будет наибольшим.

Расчет показателя Π_{gi} производится по следующим формулам:

– для низких источников:

$$\Pi_{gi} = \frac{M_i}{\text{ПДК}_i} - L, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (5.14)$$

– для высоких источников:

$$\Pi_{gi} = \frac{M_i}{\text{ПДК}_i \cdot 10^3}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5.15)$$

где ПДК_i для промышленной площадки, где воздух используется в системе приточной вентиляции, принимается равным $\text{ПДК}_i = 0,3\text{ПДК}_{\text{р.з.}i}$; а для населенных пунктов – $\text{ПДК}_i = \text{ПДК}_{\text{макс.р.}i}$.

Соблюдение условия безвредности по доминирующему веществу, безусловно, обеспечит ПДК по другим веществам меньшим значением П_{gi} .

При совместном присутствии в составе ПДВ веществ, обладающих как разнонаправленным, так и суммарным действием, показатель доминируемости для группы из однонаправленных веществ рассчитывается следующим образом:

– для низких источников по формуле

$$\text{П}'_g = \frac{M_1}{\text{ПДК}_1} + \frac{M_2}{\text{ПДК}_2} + \dots + \frac{M_m}{\text{ПДК}_m} - L, \text{ м}^3/\text{с}; \quad (5.16)$$

– для высоких источников по формуле

$$\text{П}'_g = \frac{M_1}{\text{ПДК}_1 \cdot 10^3} + \frac{M_2}{\text{ПДК}_2 \cdot 10^3} + \dots + \frac{M_m}{\text{ПДК}_m \cdot 10^3}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (5.17)$$

где 1, 2, ..., m – вид и общее количество однонаправленных веществ.

Если П_{gi} окажется наибольшим, последующий расчет ПДВ следует вести для данной группы однонаправленных веществ, для которой предварительно необходимо найти условную концентрацию C'_1 и условный выброс M'_1 всех однонаправленных веществ на основе приведения их к первому веществу с использованием следующих формул:

$$C'_1 = C_1 + C_2 \frac{\text{ПДК}_1}{\text{ПДК}_2} + \dots + C_m \frac{\text{ПДК}_1}{\text{ПДК}_m}, \text{ мг}/\text{м}^3; \quad (5.18)$$

$$M'_1 = M_1 + M_2 \frac{\text{ПДК}_1}{\text{ПДК}_2} + \dots + M_m \frac{\text{ПДК}_1}{\text{ПДК}_m}, \text{ мг}/\text{м}^3. \quad (5.19)$$

5 Рассчитать для доминирующего вещества ожидаемую концентрацию C_x (C_y), $\text{мг}/\text{м}^3$, в расчетной точке с учетом высотной категории источника выброса по формулам из таблицы 5.2 или 5.3.

Таблица 5.2 – Расчетные формулы для низких источников загрязнения

Вид здания	Место расположения устья источника	Место определения концентрации	Формулы для расчета концентраций вредных веществ
Узкое отдельностоящее	В единой циркуляционной зоне или над ней	В единой циркуляционной зоне при $0 < x \leq 6H_{зд}$	$C_x = \frac{1,3M \cdot k}{v} \left(\frac{0,6}{H_{зд} \cdot l_{зд}} + \frac{42}{(1,4l_{зд} + b_{зд} + x)^2} \right); \quad (5.20)$ $C_y = \frac{1,3M \cdot k}{v} \left(\frac{0,6}{H_{зд} \cdot l_{зд}} + \frac{42}{(1,4l_{зд} + b_{зд} + x)^2} \cdot S_1 \right) \quad (5.21)$
		Вне циркуляционной зоны за зданием на расстоянии x от заветренной стены при $x > 6H_{зд}$	$C_x = \frac{55M \cdot k}{v \cdot (1,4l_{зд} + b_{зд} + x)^2}; \quad (5.22)$ $C_y = \frac{55M \cdot k}{v \cdot (1,4l_{зд} + b_{зд} + x)^2} \cdot S_1 \quad (5.23)$
		При определении C_x и C_y для точечного источника, когда значение $l_{зд}$ превышает $10H_{зд}$, вместо второго слагаемого следует подставлять предельное значение $l_{зд}$, равное $10H_{зд}$	

Продолжение таблицы 5.2

Вид здания	Место расположения устья источника	Место определения концентрации	Формулы для расчета концентраций вредных веществ
Широкое отдельно стоящее	В наветренной циркуляционной зоне	В заветренной циркуляционной зоне при $0 < x \leq 4H_{зд}$	$C_x = \frac{5,6M \cdot t}{v \cdot l_{зд} \cdot H_{зд}}; \quad (5.24)$ $C_y = \frac{5,6M \cdot t}{v \cdot l_{зд} \cdot H_{зд}} \cdot S_1 \quad (5.25)$
		Вне заветренной циркуляционной зоны за зданием на расстоянии от заветренной стены $x > 4H_{зд}$	$C_x = \frac{15M \cdot k}{v \cdot l_{зд} \cdot (b_{зд} + x)}; \quad (5.26)$ $C_y = \frac{15M \cdot k}{v \cdot l_{зд} \cdot (b_{зд} + x)} \cdot S_1 \quad (5.27)$
Группа зданий	В межкорпусной циркуляционной зоне при расположении первого по потоку узкого здания или над ней	В межкорпусной циркуляционной зоне при $H_{зд} < x_1 \leq 6H_{зд}$	$C_x = \frac{1,3M \cdot k}{v} \left(\frac{1,5}{x_1 \cdot l_{зд}} + \frac{42}{(1,4l_{зд} + b_{зд} + x)^2} \right); \quad (5.28)$ $C_y = \frac{1,3M \cdot k}{v} \left(\frac{1,5}{x_1 \cdot l_{зд}} + \frac{42}{(1,4l_{зд} + b_{зд} + x)^2} \cdot S_1 \right) \quad (5.29)$

Продолжение таблицы 5.2

Вид здания	Место расположения устья источника	Место определения концентрации	Формулы для расчета концентраций вредных веществ
Группа зданий	В межкорпусной циркуляционной зоне при расположении первого по потоку узкого здания или над ней	при $6H_{зд} < x_1 \leq 10H_{зд}$	$C_x = \frac{1,3M \cdot k}{v} \left(\frac{0,25}{l_{зд} \cdot H_{зд}} + \frac{42}{(1,4l_{зд} + b_{зд} + x)^2} \right); \quad (5.30)$ $C_y = \frac{1,3M \cdot k}{v} \left(\frac{0,25}{l_{зд} \cdot H_{зд}} + \frac{42}{(1,4l_{зд} + b_{зд} + x)^2} \cdot S_1 \right) \quad (5.31)$
	В наветренной циркуляционной зоне первого по потоку широкого здания	В межкорпусной циркуляционной зоне при $H_{зд} < x_1 \leq 4H_{зд}$	$C_x = \frac{14,4M \cdot m}{v \cdot l_{зд} \cdot x_1}; \quad (5.32)$ $C_y = \frac{14,4M \cdot m}{v \cdot l_{зд} \cdot x_1} \cdot S_1 \quad (5.33)$
		при $4H_{зд} < x_1 \leq 8H_{зд}$	$C_x = \frac{3,6M \cdot m}{v \cdot l_{зд} \cdot H_{зд}}; \quad (5.34)$ $C_y = \frac{3,6M \cdot m}{v \cdot l_{зд} \cdot H_{зд}} \cdot S_1 \quad (5.35)$

Таблица 5.3 – Расчетные формулы для высоких источников загрязнения атмосферы

Искомая величина	Формулы для расчета при выбросах	
	нагретых	холодных
Максимальная концентрация вредных веществ в приземном воздухе C_m , мг/м ³ , от одиночного источника на расстоянии X_m от источника по оси факела	$C_m = \frac{AMFmn}{H^2 \sqrt[3]{L\Delta T}} \quad (5.36)$	$C_m = \frac{AMFDn}{8LH \sqrt[3]{H}} \quad (5.37)$
Максимальная скорость выхода парогазовоздушной смеси из трубы v_m , м/с	$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{L\Delta T}{H}} \quad (5.38)$	$v_m = 1,3 \frac{v_{пгв} D}{H} \quad (5.39)$
Концентрация вредных веществ C_x , мг/м ³ , в любой точке по оси факела на расстоянии x от источника выброса	$C_x = C_m S_1 \quad (5.40)$	
Концентрация вредных веществ C_y , мг/м ³ , на расстоянии y от оси факела, отсчитывается по перпендикуляру к направлению среднего ветра	$C_y = C_x S_2 \quad (5.41)$	
Расстояние X_m , м, на котором достигается максимальная концентрация	$X_m = dH \quad (5.42)$	
Предельно допустимый выброс $M_{пдв}$, мг/с, вредных веществ в атмосферу из одиночного источника, при котором обеспечивается ПДК в приземном слое	$M_{пдв} = \frac{ПДК H^2 \sqrt[3]{L\Delta T}}{AFmn} \quad (5.43)$	$M_{пдв} = \frac{8ПДК LH \sqrt[3]{H}}{AFnD} \quad (5.44)$
Предельно допустимый выброс $M_{пдв}$, мг/с, при величине фоновго загрязнения атмосферных потоков с содержанием вредных веществ C_ϕ , мг/м ³	$M_{пдв} = \frac{(ПДК - C_\phi) H^2 \sqrt[3]{L\Delta T}}{AFmn} \quad (5.45)$	$M_{пдв} = \frac{8(ПДК - C_\phi) LH \sqrt[3]{H}}{AFnD} \quad (5.46)$

6 Если на промплощадке расчетные значения $C_x \leq 0,3\text{ПДК}_{\text{р.з}}$ или $C_y = 0,3\text{ПДК}_{\text{р.з}}$, то требование безопасности к воздушной среде обеспечено и в последующем расчете ПДВ нет необходимости. Но при условии $C_x > 0,3\text{ПДК}_{\text{р.з}}$ или $C_y \geq 0,3\text{ПДК}_{\text{р.з}}$ необходимо ограничение валового выброса M до уровня ПДВ. Для населенных мест расчет ПДВ выполняется в случае, если $C_x > \text{ПДК}_{\text{макс.р}}$ или $C_y > \text{ПДК}_{\text{макс.р}}$.

В формулах таблиц 5.2 и 5.3 приняты следующие обозначения:

v – расчетная скорость ветра, м/с. Принимать равной 1 м/с;

$l_{\text{зд}}$ и $b_{\text{зд}}$ – длина и ширина здания, м;

k – безразмерный коэффициент, учитывающий возвышение устья источника над зданием. Определяется по графику на рисунке 5.4. При выбросе вредных веществ из источников в наветренную или единую циркуляционную зону принимают равным 1;

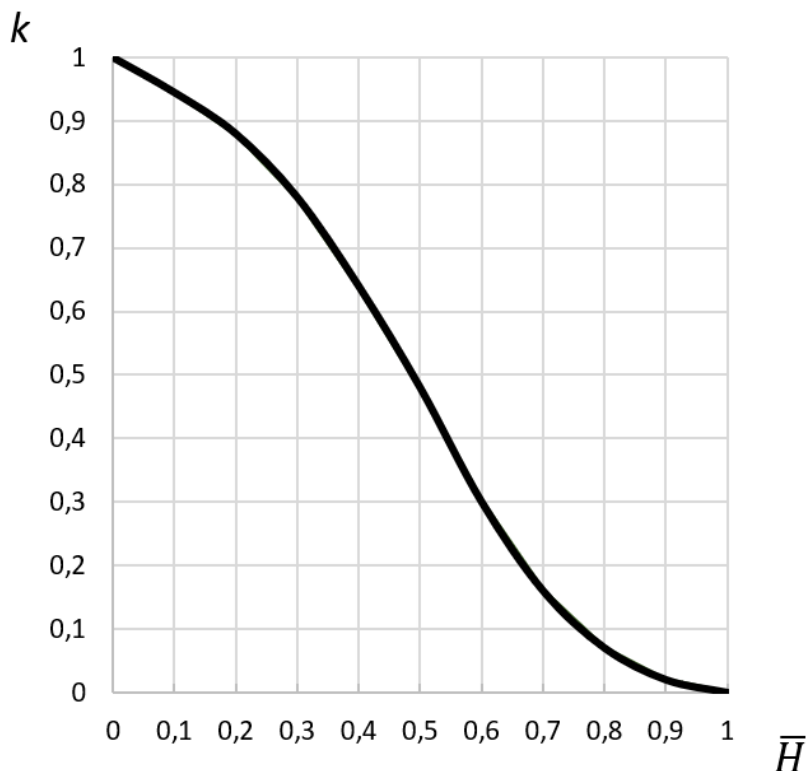


Рисунок 5.4 – График для определения коэффициента k , учитывающего

возвышение устья источника над зданием, где $\bar{H} = \frac{H - 1,8H_{\text{зд}}}{H_{\text{гр}} - 1,8H_{\text{зд}}}$ –

при расположении устья источника вне единой или межкорпусной зоны узкого здания и над наветренной зоной широкого здания; $\bar{H} = \frac{H - H_{\text{зд}}}{H_{\text{гр}} - H_{\text{зд}}}$ –

при расположении устья источника вне наветренной, над заветренной или над межкорпусной зоной широкого здания

m – безразмерный коэффициент (в таблице 5.2), показывающий, какое количество выделяемых источниками примесей участвует в загрязнении циркуляционных зон. Определять эту величину следует по графикам на рисунках 5.5 и 5.6;

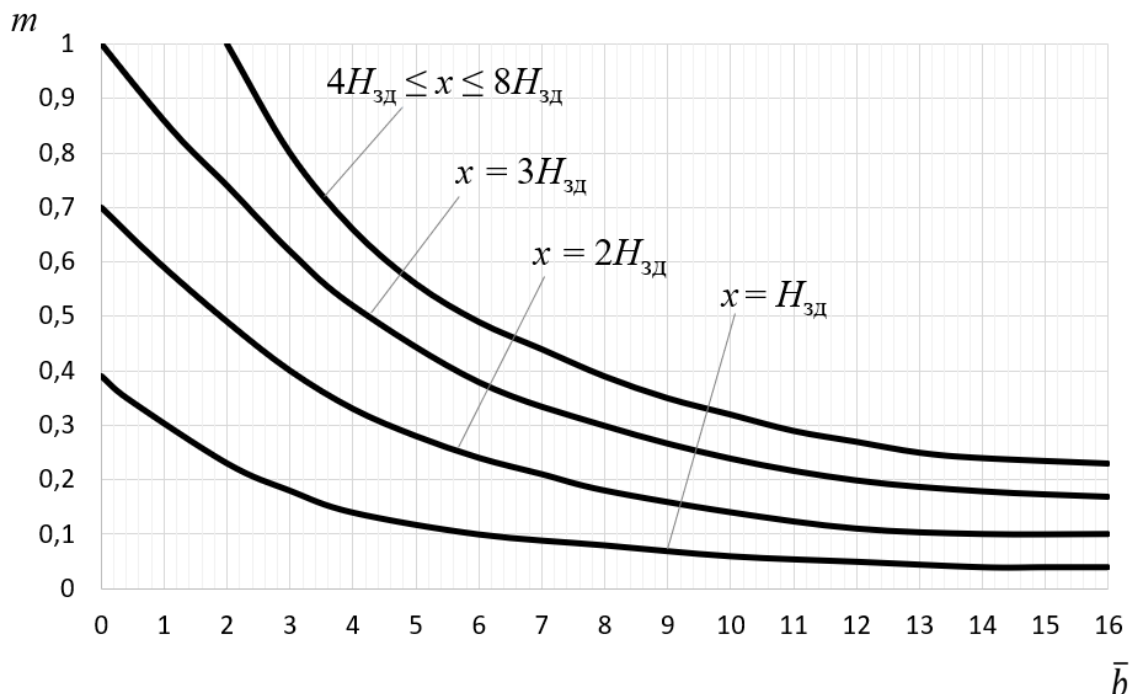


Рисунок 5.5 – Величина коэффициента m для точечных источников, размещенных в наветренной циркуляционной зоне ($\bar{b} = b_{зд} / H_{зд}$) и вне этой зоны ($\bar{b} = b_{ист} / H_{зд}$) на крыше отдельно стоящего здания

x – расстояние от расчетной точки до заветренной стены здания с источником выброса, м;

x_1 – расстояние между двумя параллельно расположенными зданиями (см. рисунок 5.3), м;

S_1 – безразмерный коэффициент (в таблице 5.2), учитывающий снижение концентраций при удалении от оси факела рассеивания к его границам. Определяется по графику на рисунке 5.7;

C_x (C_y) – ожидаемая концентрация вредного вещества, мг/м³;

C_m – максимальная концентрация вредного вещества в приземном воздухе, мг/м³;

F – коэффициент, равный 1 для газов; 2–3 – для пылей;

L – объем выбрасываемой пылегазовоздушной смеси, м³/с;

m , n – безразмерные коэффициенты (в таблице 5.3), учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса (принимаются после расчета параметров f и v_m по графикам на рисунках 5.8 и 5.9);

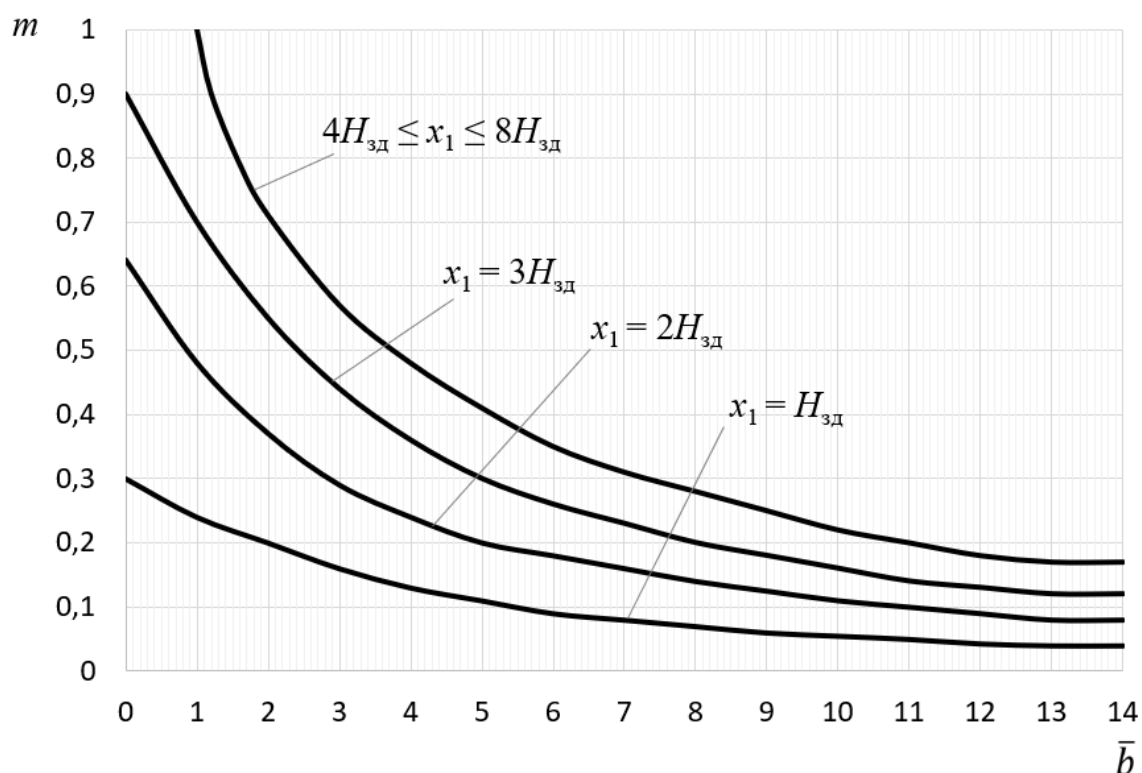


Рисунок 5.6 – Величина коэффициента m для точечных источников, размещенных в наветренной циркуляционной зоне ($\bar{b} = b_{зд} / H_{зд}$) и вне этой зоны ($\bar{b} = b_{ист} / H_{зд}$) на крыше первого по потоку широкого здания

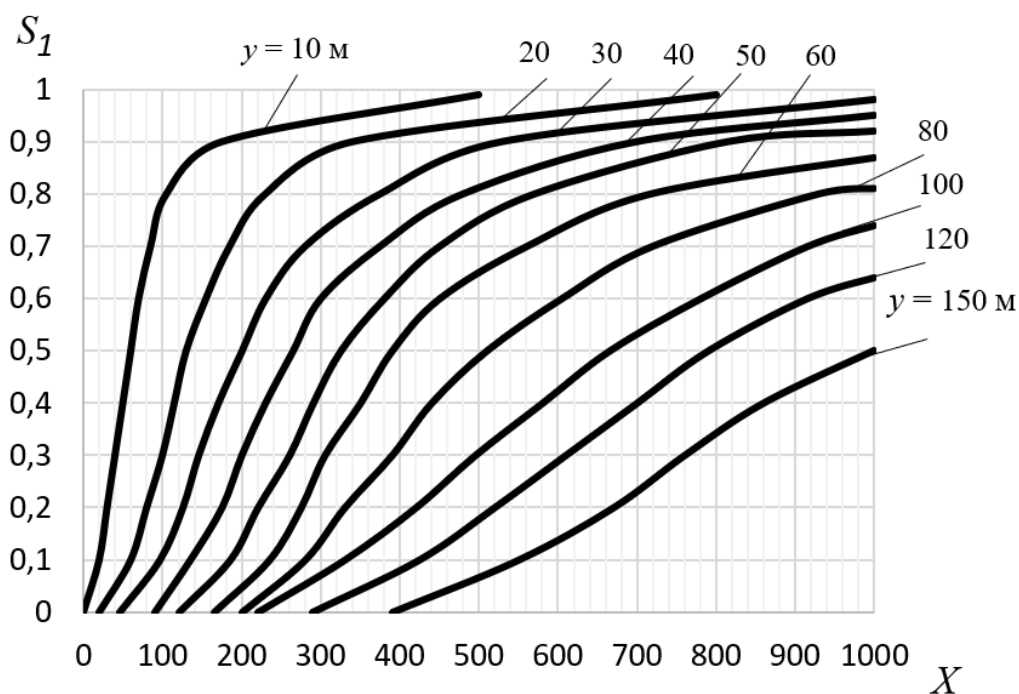


Рисунок 5.7 – График для определения значений безразмерного коэффициента S_1 , где $X = 1,4l_{зд} + b_{зд} + x$; y – кратчайшее расстояние от расчетной точки до оси факела

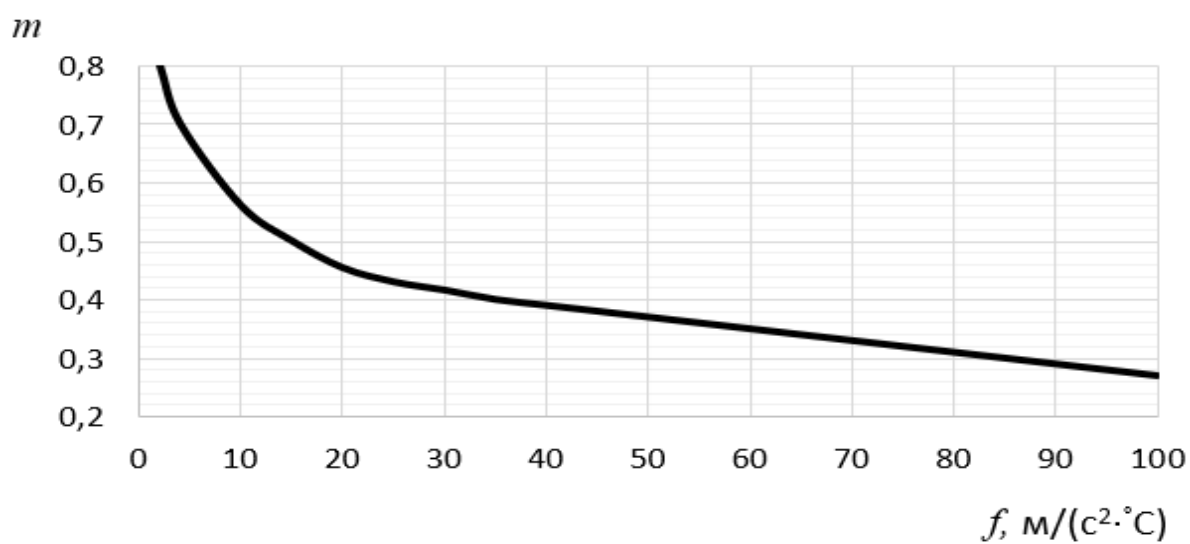
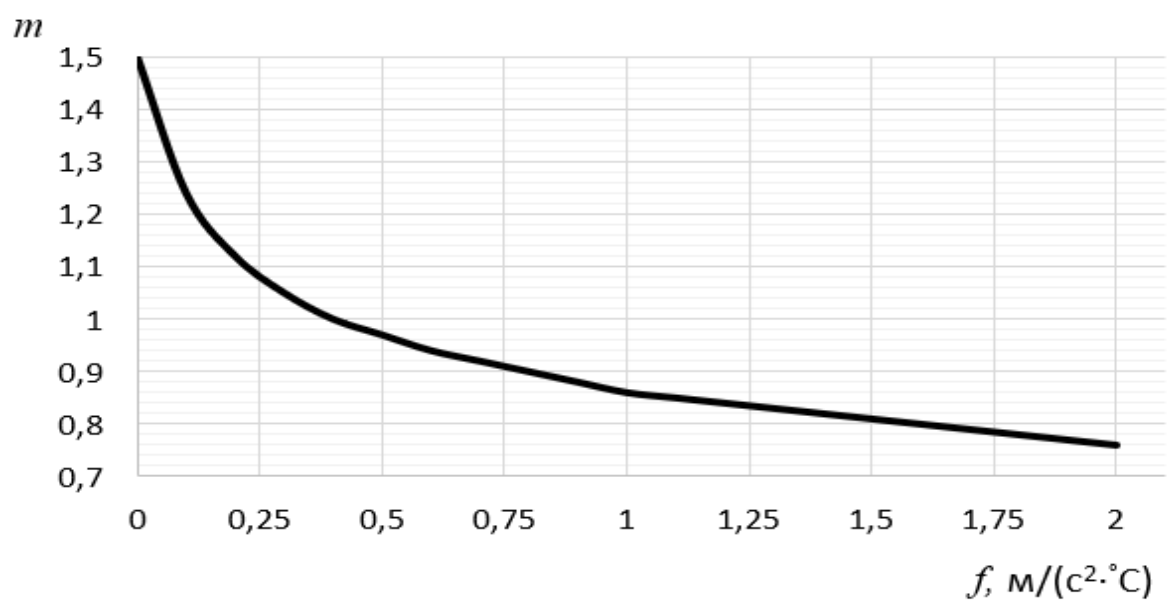


Рисунок 5.8 – Графики для определения коэффициента m

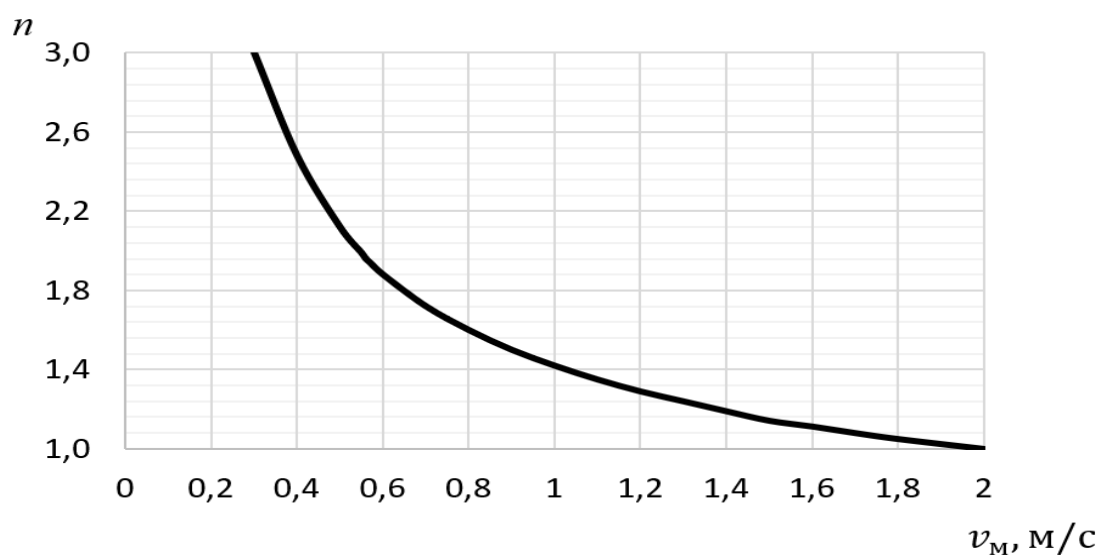


Рисунок 5.9 – График для определения коэффициента n

S_1 , S_2 – вспомогательные величины (в таблице 5.3), определяющие падение концентрации соответственно по оси факела x и по оси y ; принимаются по графикам на рисунках 5.10–5.13;

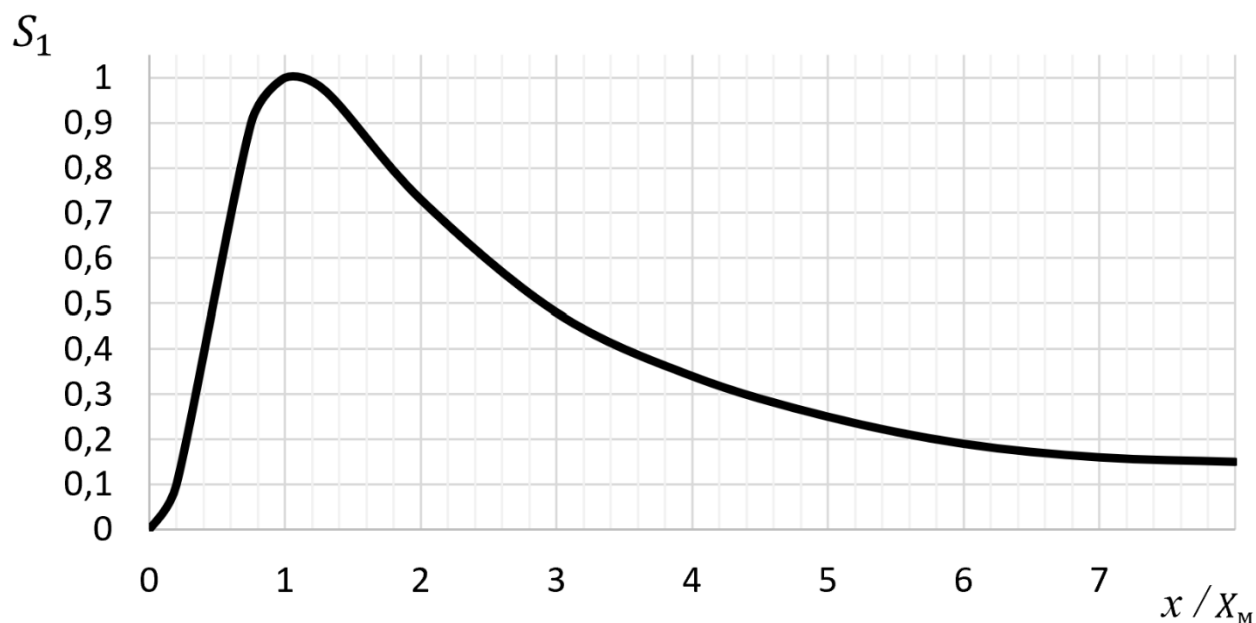


Рисунок 5.10 – График для определения вспомогательной величины S_1 при выбросе из высокого источника и x/X_m от 1 до 8

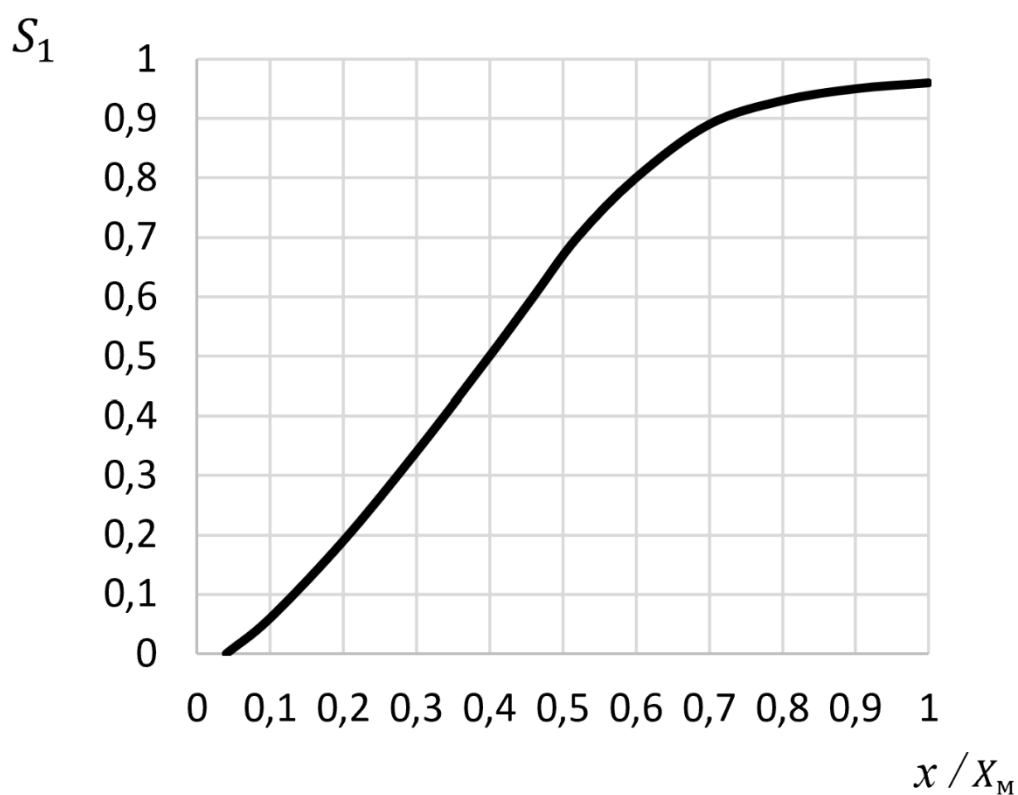


Рисунок 5.11 – График для определения вспомогательной величины S_1 при выбросе из высокого источника и x/X_m от 0,1 до 1

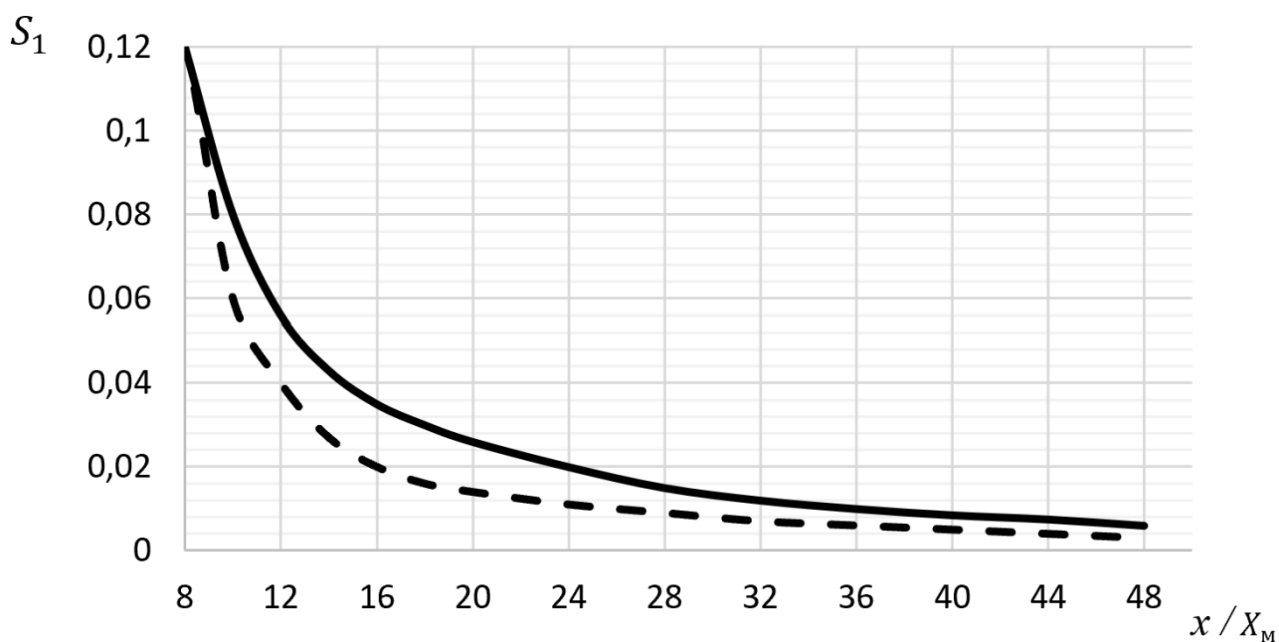


Рисунок 5.12 – График для определения вспомогательной величины S_1 при выбросе из высокого источника и x / X_m от 8 до 50 (сплошная кривая при $F = 1$, пунктирная кривая при $F = 2; 2,5$ или 3)

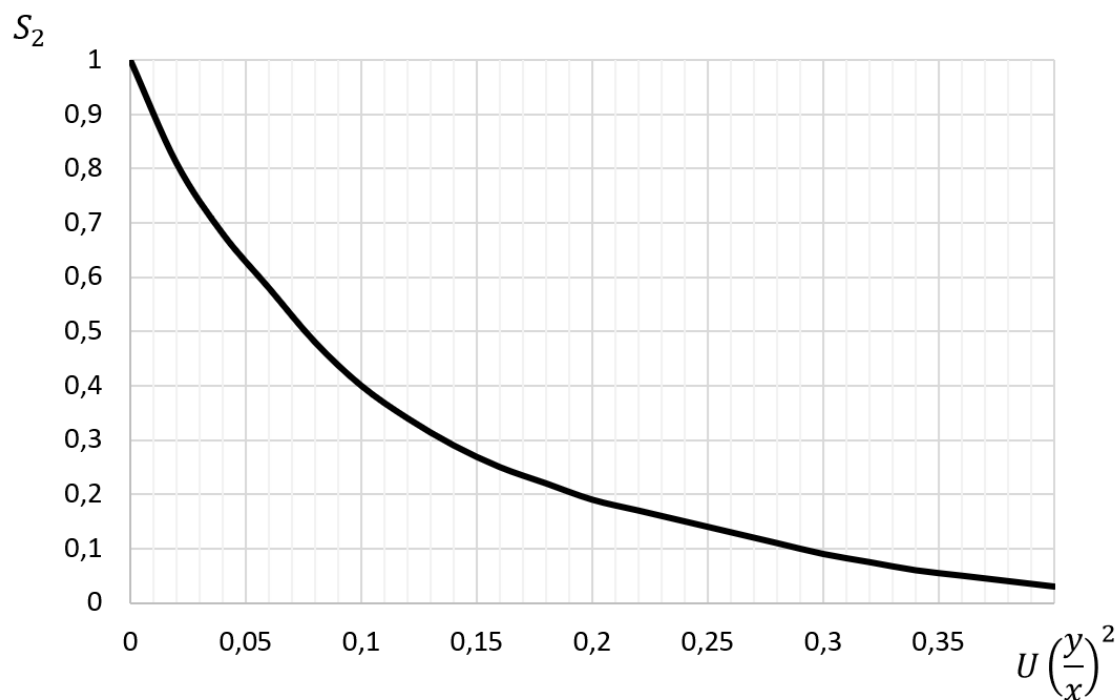


Рисунок 5.13 – График для определения вспомогательной величины S_2 при выбросе из высоких источников, где U – опасная скорость ветра, м/с, принимаемая $U = 0,5$ при $v_m < 0,5$; $U = v_m$ при $0,5 < v_m \leq 2$;
 $U = v_m(1 + 0,12\sqrt{f})$ при $v_m > 2$

d – безразмерная величина, определяемая по графикам на рисунках 5.14, 5.15.

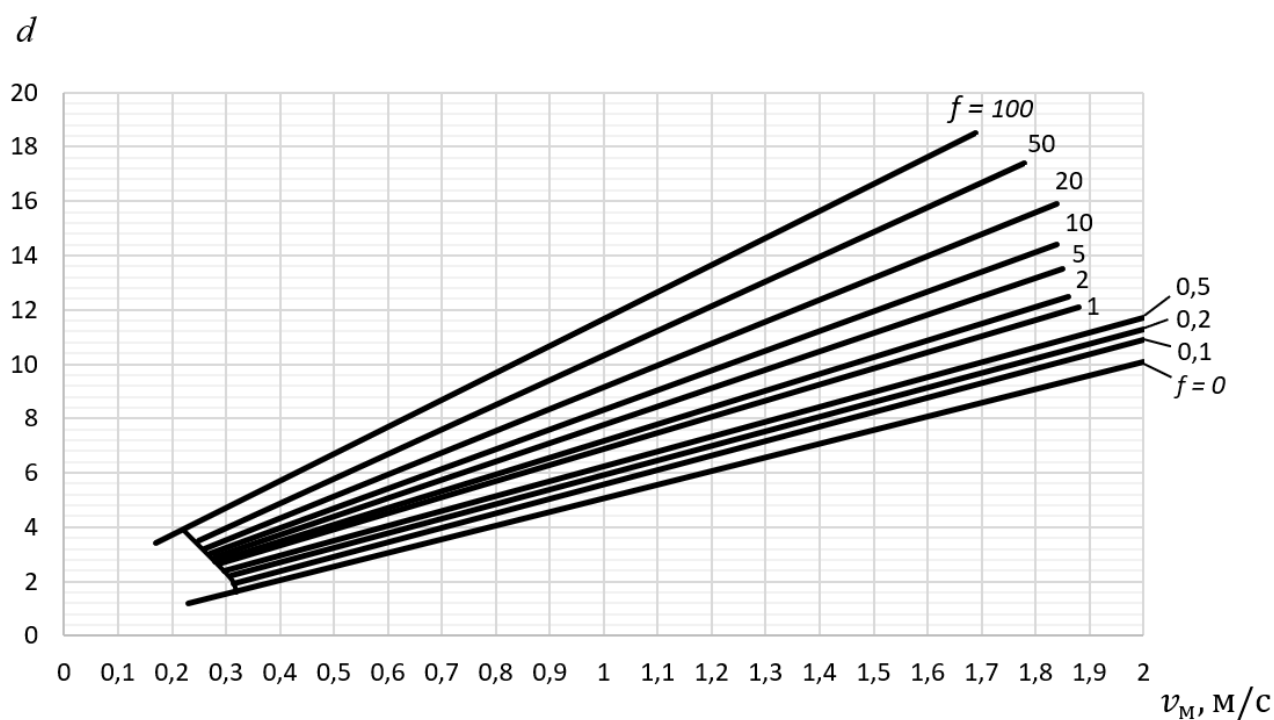


Рисунок 5.14 – График для определения вспомогательной величины d при $v_M \leq 2$

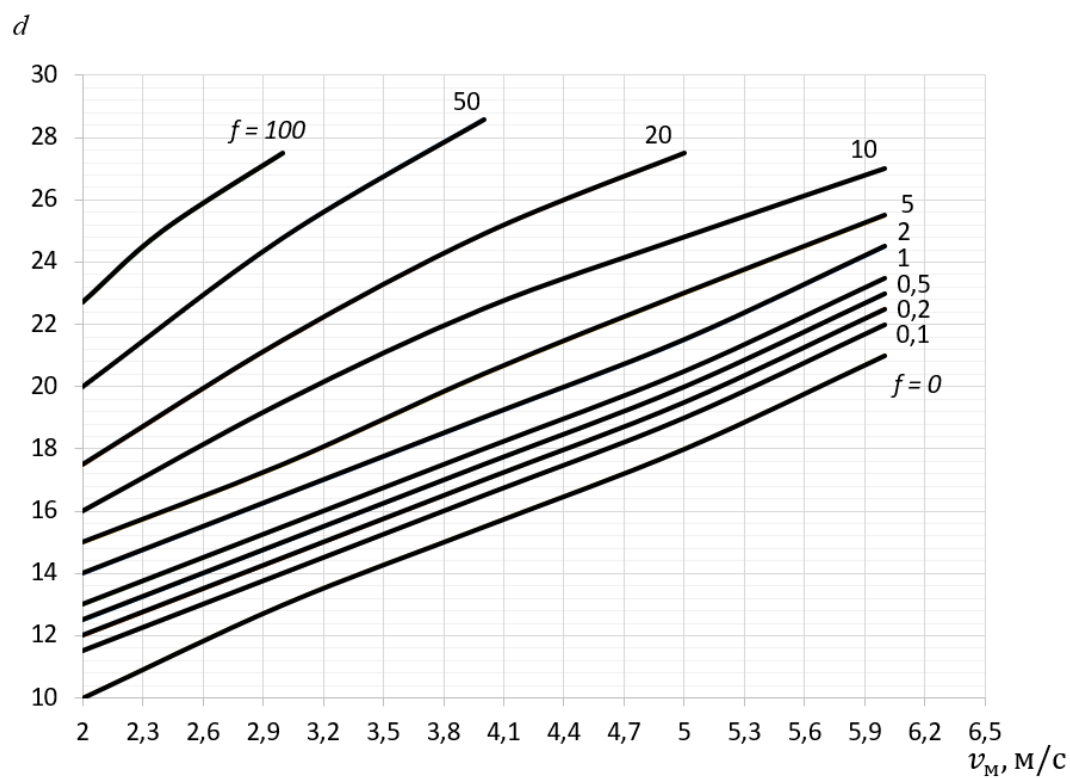


Рисунок 5.15 – График для определения вспомогательной величины d при $2 < v_M \leq 8$

A – коэффициент стратификации атмосферы, равный 200 для Средней Азии, Казахстана, Нижнего Поволжья, Кавказа; 160 – для севера, северо-запада России, Беларуси и Украины; 120 – для центральной части России, Беларуси;

M – валовый выброс вредного вещества, выбрасываемого в атмосферу, мг/с.

Расчет рассеивания выбросов из низких источников. Формулы для расчета ожидаемой концентрации вредных веществ в наружном воздухе (C_x , C_y) при загрязнении его выбросами из низких точечных источников выбирают в зависимости от вида здания (узкое или широкое отдельно стоящее, группа зданий), места расположения устья источника и места определения концентрации (см. таблицу 5.2).

В случаях загрязненности поступающих к источнику выброса воздушных потоков с фоновым содержанием вредных веществ C_ϕ и воздействия на контролируемую зону N источников приземная концентрация вредного вещества в расчетной точке определяется по формуле

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_N + C_\phi, \text{ мг/м}^3, \quad (5.47)$$

где $C_1, C_2, \dots, C_N$ – концентрации вредных веществ в расчетной точке от отдельных источников.

Определение ПДВ для низких источников. Если концентрация вредных веществ в расчетной точке превышает допустимое значение (ПДК), наиболее экономически эффективным способом оздоровления воздушной среды является комплекс санитарно-защитных мероприятий по снижению валового выброса M до предельно допустимого $M_{\text{ПДВ}}$, величина которого может быть рассчитана с использованием формул из таблицы 5.2.

При этом принимаем:

$C_x(C_y) = \text{ПДК}_{\text{макс.р}}$ – для территории жилой застройки;

$C_x(C_y) = 0,3\text{ПДК}_{\text{р.з}}$ – для территорий промплощадки предприятия;

$M = M_{\text{ПДВ}}$.

В результате подстановки в исходную формулу допустимой концентрации и требуемого для ее обеспечения валового выброса получаем уравнение, которое следует решать относительно $M_{\text{ПДВ}}$. Так, например, для расчетной точки при ее нахождении на оси факела рассеивания низкого источника выброса и в пределах единой циркуляционной зоны на территории промплощадки (случай, определяемый исходной формулой (5.20)) будем иметь

$$C_x(C_y) = 0,3\text{ПДК}_{\text{р.з}} = \frac{1,3M_{\text{ПДВ}}k}{v} \left(\frac{0,6}{H_{\text{зд}}l_{\text{зд}}} + \frac{42}{(1,4l_{\text{зд}} + b_{\text{зд}} + x)^2} \right), \text{ мг/м}^3;$$

$$M_{\text{ПДВ}} = \frac{0,3\text{ПДК}_{\text{р.з}}v}{1,3k \left(\frac{0,6}{H_{\text{зд}}l_{\text{зд}}} + \frac{42}{(1,4l_{\text{зд}} + b_{\text{зд}} + x)^2} \right)}, \text{ мг/с.} \quad (5.48)$$

В случае загрязненности воздушного потока доминирующим веществом с содержанием C_{ϕ} допустимый валовый выброс следует рассчитывать по формуле (5.48) с учетом вычета C_{ϕ} :

$$M_{\text{ПДВ}} = \frac{(0,3\text{ПДК}_{\text{р.з}} - C_{\phi})v}{1,3k \left(\frac{0,6}{H_{\text{зд}}l_{\text{зд}}} + \frac{42}{(1,4l_{\text{зд}} + b_{\text{зд}} + x)^2} \right)}, \text{ мг/с.}$$

Для расчетной точки при ее нахождении на расстоянии y от оси факела рассеивания низкого источника выброса и вне циркуляционной зоны на территории жилой застройки (случай, определяемый исходной формулой (5.23)) допустимый валовый выброс $M_{\text{ПДВ}}$ определяется из соотношений

$$C_y = \text{ПДК}_{\text{макс.р}} = \frac{55M_{\text{ПДВ}}k}{v(1,4l_{\text{зд}} + b_{\text{зд}} + x)^2} \cdot S_1, \text{ мг/м}^3;$$

$$M_{\text{ПДВ}} = \frac{\text{ПДК}_{\text{макс.р}}v(1,4l_{\text{зд}} + b_{\text{зд}} + x)^2}{55kS_1}, \text{ мг/с.}$$

Аналогично могут быть найдены аналитические зависимости и рассчитаны по ним $M_{\text{ПДВ}}$ для других случаев расположения расчетных точек и низких источников выбросов, приведенных в таблице 5.2.

Расчет рассеивания и ПДВ для высоких источников. На распространение выбросов из высоких источников существенно влияет температура пылегазовоздушной смеси, по которой они разделяются на нагретые и холодные. Соответственно различаются и расчеты рассеивания. Критерием для выбора расчетных формул при нагретых и холодных выбросах служит величина вспомогательного параметра

$$f = 10^3 \frac{v_{\text{ПГВ}}^2 D}{H^2 \Delta T}, \quad (5.49)$$

где f – вспомогательный параметр, м/(с²·°С);

$v_{\text{ПГВ}}$ – скорость выхода пылегазовоздушной смеси из трубы, м/с;

D – диаметр устья трубы, м;

H – высота выброса вредных веществ (высота трубы от уровня земли), м;

ΔT – разность между температурой выбрасываемой пылегазовоздушной смеси $T_{\text{см}}$ и температурой окружающего (наружного) воздуха $T_{\text{н}}$, °С.

При $f < 100$ м/(с²·°С) и $\Delta T > 0$ расчет ведут по формулам для нагретых выбросов; при $f \geq 100$ м/(с²·°С) или $\Delta T \leq 0$ – по формулам для холодных выбросов.

Формулы для расчета ожидаемой концентрации вредных веществ в расчетной точке вспомогательных параметров для ее определения и ПДВ, если расчетная концентрация превышает ПДК, приведены в таблице 5.3.

При нескольких источниках выброса, загрязняющих атмосферный воздух в расчетной точке, приземная концентрация вредных веществ в ней будет составлять сумму содержаний C_i от каждого из N источников и фоновое содержание $C_{\text{ф}}$ вредных веществ в поступающих к расчетной точке воздушных потоках

$$C_{x(y)} = \sum_1^N C_i + C_{\text{ф}}. \quad (5.50)$$

Необходимость расчета $M_{\text{ПДВ}}$ возникает, если в контролируемой зоне $C_{x(y)} > \text{ПДК}$ для доминирующего вредного вещества.

Основные методы и средства обеспечения ПДВ на производстве. Снижение валового выброса вредных веществ в атмосферу и нормализация их содержания в воздухе промплощадки и в жилой зоне достигается применением следующих основных способов и средств:

1 Совершенствование технологии, заключающееся в замене в производственном процессе вредных веществ безвредными или менее вредными; в гигиенической стандартизации состава и предварительной очистке сырья от вредных примесей (например, удаление серы из топлива); в замене сухих способов переработки пылящих материалов мокрыми; в использовании более экологичных способов тепловой обработки материалов (например, замена пламенного нагрева электрическим); в обеспечении непрерывности

производственных процессов и автоматизированного контроля за соблюдением установленного режима и др.

2 Совершенствование производственного оборудования и аппаратуры путем герметизации, укрытия пылящих узлов, организации парогазовых трактов под разряжением, локализации мест газовыделений и др.

3 Рациональное размещение зданий на промплощадке и предприятий относительно жилой зоны с учетом вида и особенностей производства, природно-климатических и атмосферных условий данной территории (рельефа местности, интенсивности и направленности ветров). При этом защищаемые объекты должны располагаться относительно источника выброса с наветренной стороны, вне зон технологических и вентиляционных выбросов.

4 Создание санитарно-защитных зон между источником выброса и жилой зоной требуемой ширины и их озеленение древесно-кустарниковой растительностью.

5 Подъем выбросных отверстий над земной поверхностью (увеличение ворота труб).

6 Применение пылегазоулавливающих установок, коэффициент очистки которых должен быть не ниже следующего расчетного значения:

$$\eta_0 = 100 \left(1 - \frac{M_{\text{ПДВ}}}{M} \right), \%. \quad (5.51)$$

Улавливаемые при этом вещества могут быть возвращены в производство в виде вторичного сырья, что является одной из форм малоотходной технологии, либо подлежат нейтрализации перед захоронением. В отдельных случаях для удаления токсичных веществ из пылегазовоздушной смеси возможно их сжигание (дожигание) перед выбросом в атмосферу.

7 Контроль за составом и интенсивностью выбросов, состоянием загрязненности атмосферы на промплощадках и на территориях с жилыми застройками.

Способы очистки газовых выбросов в атмосферу. Адсорбционный – вредные примеси улавливают с помощью поглотителей, в качестве которых используют активированный уголь (как в противогазе), известняк, а также поглощающие жидкости – щелочные растворы аммиака и извести. Недостатки – необходимость установки громоздкого оборудования и периодической очистки поглощающей жидкости.

Окислительный способ заключается в выжигании вредных горючих примесей до углекислого газа и воды. Недостаток – возникает проблема выбросов излишних объемов углекислого газа.

Каталитический – пропускание выбрасываемой газовой смеси через твердые катализаторы, в качестве которых чаще всего используют металлические сетки (например, из платины или ванадия) или оксиды металлов (цинка, алюминия, марганца и т. д.). *Катализаторы* – это вещества, ускоряющие химические реакции, но сами в них не расходующиеся.

Применение тех или иных методов зависит от физико-химических свойств загрязняющего вещества, его агрегатного состояния, концентрации в очищаемой среде. Иногда бывает целесообразно использовать сочетание перечисленных выше методов (например, применяют адсорбционно-окислительный метод или каталитическое окисление).

Пример решения задач

Задача 5.1. Определить ожидаемую концентрацию вредных веществ в приземном слое воздуха жилого района и при необходимости рассчитать предельно допустимый выброс химических загрязнений и требуемую эффективность газоочистительных установок для обеспечения безвредности атмосферы в жилой зоне при следующих условиях: высота трубы $H = 36$ м; ее диаметр $D = 1,5$ м; высота здания $H_{зд} = 12$ м, ширина $b_{зд} = 24$ м; расстояние от оси трубы до заветренной стороны здания $b_{ист} = 6$ м. Выбрасываемая газовоздушная смесь имеет температуру $T_{см} = 176$ °С и поступает в атмосферу со скоростью $v_{ПГВ} = 12$ м/с. В составе смеси окись углерода и двуокись азота, содержание которых в выбросе соответственно $C_{01} = 5$ г/м³ ($C_{ф1} = 0,2$ мг/м³) и $C_{02} = 1,2$ г/м³ ($C_{ф2} = 0,02$ мг/м³). Расстояние x от источника выброса до жилых строений 850 м. Средняя температура воздуха $T_{в} = 21$ °С.

Решение

1 Расчет объема выбрасываемой смеси выполним по формуле (5.4):

$$L = \frac{\pi D^2}{4} v_{ПГВ} = \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} \cdot 12 = 21,195 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2 Расчет валового выброса каждого из вредных веществ выполним по формуле (5.3):

$$M_1 = C_{01} \cdot L = 5 \cdot 21,195 = 105,98 \text{ мг/с} \text{ — окиси углерода;}$$

$$M_2 = C_{02} \cdot L = 1,2 \cdot 21,195 = 25,43 \text{ мг/с} \text{ — двуокиси азота.}$$

3 Определим категорию здания по ширине. Проверим выполнение условий по формулам (5.5), (5.6). Так как $2,5H_{зд} = 2,5 \cdot 12 = 30$ м, по условию $b_{зд} = 24$ м, то $b_{зд} < 2,5H_{зд}$. Следовательно, здание с источником выброса относится к категории «узкое».

4 Определим категорию здания по высоте. Для этого рассчитаем граничную высоту источника выброса $H_{гр}$ по формуле (5.9):

$$H_{гр} = 0,36b_{ист} + 2,5H_{зд} = 0,36 \cdot 6 + 30 = 32,16 \text{ м.}$$

Так как высота трубы по условию $H = 36$ м, то $H > H_{гр}$. Следовательно, источник выброса относится к категории высокий.

5 Определим доминирующее вещество для высокого источника выброса по формуле (5.15), где для населенных пунктов ПДК принята величина $ПДК_{макс.р.}$:

$$П_{g1} = \frac{M_1}{ПДК_1 \cdot 10^3} = \frac{105,98}{3 \cdot 10^3} = 35,33 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с};$$

$$П_{g2} = \frac{M_2}{ПДК_2 \cdot 10^3} = \frac{25,43}{0,085 \cdot 10^3} = 299,2 \cdot 10^{-3}, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так как $П_{g1} < П_{g2}$, то доминирующим веществом является двуокись азота.

6 Для оценки тепловой характеристики выброса определим вспомогательный параметр f по формуле (5.49):

$$f = 10^3 \frac{v_{ПГВ}^2 D}{H^2 (T_{см} - T_{в})} = 10^3 \cdot \frac{12^2 \cdot 1,5}{36^2 \cdot (176 - 21)} \approx 1,075 \text{ м}/(\text{с}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Так как $\Delta T = T_{см} - T_{в} = 155 ^\circ\text{C} > 0$ и $f < 100 \text{ м}/(\text{с}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, выброс относится к категории нагретых.

7 С учетом условий выброса (источник высокий, выбрасываемая смесь нагретая) по формуле (5.36) определим максимальную концентрацию доминирующего вредного вещества в приземном слое воздуха:

$$C_m = \frac{AMFmn}{H^2 \sqrt[3]{L\Delta T}}, \text{ мг}/\text{м}^3;$$

где $A = 120$; $F = 1$, так как вредное вещество является газообразным;

$m = 0,86$, так как $f = 1,075$ (см. рисунок 5.7).

Для определения коэффициента n по формуле (5.38) рассчитаем максимальную скорость выхода парогазовоздушной смеси из трубы v_m :

$$v_m = 0,65 \sqrt[3]{\frac{L\Delta T}{H}} = 0,65 \sqrt[3]{\frac{21,195 \cdot 155}{36}} = 2,93 \text{ м/с.}$$

При $v_m = 2,93$ м/с коэффициент $n = 1$ (см. рисунок 5.9):

$$C_m = \frac{AMFmn}{H^2 \sqrt[3]{L\Delta T}} = \frac{120 \cdot 25,43 \cdot 1 \cdot 0,86 \cdot 1}{36^2 \cdot \sqrt[3]{21,195 \cdot 155}} = 0,136 \text{ мг/м}^3.$$

8 Расстояние X_m от источника выброса, на котором достигается максимальная концентрация вредного вещества – двуокиси азота, рассчитываем по формуле (5.42):

$$X_m = d \cdot H = 15 \cdot 36 = 540 \text{ м,}$$

где d – параметр, величина которого установлена по графику на рисунке 5.15 при $f = 1,1$ м/(с² · °С) и $v_m = 2,93$ м/с.

9 Приземную концентрацию двуокиси азота на границе жилой зоны рассчитываем по формуле (5.50):

$$C_{жз} = C_m \cdot S_1 + C_{ф2} = 0,136 \cdot 0,9 + 0,02 = 0,142 \text{ мг/м}^3.$$

Вспомогательная величина $S_1 = 0,9$ определена по графику (см. рисунки 5.10–5.12) в зависимости от отношения $x / X_m = 850 / 540 = 1,57$.

10 Так как концентрация двуокиси азота в жилой зоне превышает предельно допустимое максимально разовое значение $C_{жз} = 0,142 > \text{ПДК}_{\text{макс.р.2}} = 0,085$, то наиболее эффективным способом оздоровления воздушной среды является комплекс санитарно-защитных мероприятий по снижению валового выброса M до предельно допустимого $M_{\text{ПДВ}}$. Расчет $M_{\text{ПДВ}}$ выполним по формуле (5.45):

$$M_{\text{ПДВ}} = \frac{(\text{ПДК}_{\text{макс.р.2}} - C_{\phi 2}) H^2 \sqrt[3]{L \Delta T}}{A F m n} = \frac{(0,085 - 0,02) \cdot 36^2 \cdot \sqrt[3]{21,195 \cdot 155}}{120 \cdot 1 \cdot 0,86 \cdot 1} =$$

$$= 12,135 \text{ г/с.}$$

11 Для обеспечения комплекса санитарно-защитных мероприятий по снижению валового выброса до предельно допустимого $M_{\text{ПДВ}}$ необходимо применить газоочистные установки с коэффициентом очистки, который определим по формуле (5.51):

$$\eta_0 = 100 \left(1 - \frac{M_{\text{ПДВ}}}{M} \right) = 100 \left(1 - \frac{12,135}{25,43} \right) = 52,29 \text{ \%}.$$

Задача 5.2. Рассчитать концентрацию вредных веществ в воздухе промплощадки на расстоянии $x_{\text{пром}} = 64$ м от источника выброса (для пункта воздухозабора приточной вентиляции) и в воздухе прилегающей жилой территории на расстоянии от источника выброса $x_{\text{жз}} = 214$ м при следующих условиях: источник выброса – труба высотой $H = 18$ м и диаметром $D = 0,8$ м, расположенная от заветренной стороны здания на расстоянии $b_{\text{ист}} = 20$ м. Источник выброса – отдельно стоящее здание высотой $H_{\text{зд}} = 15$ м, шириной $b_{\text{зд}} = 24$ м, длиной $l_{\text{зд}} = 80$ м. Выбрасываемая газовоздушная смесь имеет температуру $T_{\text{см}} = 52$ °С и поступает в атмосферу со скоростью $v_{\text{ПГВ}} = 10$ м/с. В составе смеси ксилол и ацетон, содержание которых в выбросе соответственно $C_{01} = 120$ мг/м³ ($C_{\phi 1} = 0,03$ мг/м³) и $C_{02} = 95$ мг/м³ ($C_{\phi 2} = 0,08$ мг/м³). Средняя температура воздуха $T_{\text{в}} = 24$ °С.

Решение

1 Рассчитаем объем выбрасываемой смеси по формуле (5.4):

$$L = \frac{\pi D^2}{4} v_{\text{ПГВ}} = \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} \cdot 10 = 5,024 \text{ м}^3/\text{с}.$$

2 Расчет валового выброса каждого из вредных веществ выполним по формуле (5.3):

$$M_1 = C_{01} \cdot L = 120 \cdot 5,024 = 602,88 \text{ мг/с} - \text{ксилола};$$

$$M_2 = C_{02} \cdot L = 95 \cdot 5,024 = 477,28 \text{ мг/с} - \text{ацетона}.$$

3 Определим категорию здания по ширине. Проверим выполнение условий по формулам (5.5), (5.6). Так как $2,5H_{зд} = 2,5 \cdot 15 = 37,7$ м, по условию $b_{зд} = 24$ м, то $b_{зд} < 2,5H_{зд}$. Следовательно, здание с источником выброса относится к категории «узкое».

4 Определим категорию здания по высоте. Для этого рассчитаем граничную высоту источника выброса $H_{гр}$ по формуле (5.9):

$$H_{гр} = 0,36b_{ист} + 2,5H_{зд} = 0,36 \cdot 20 + 2,5 \cdot 15 = 44,7 \text{ м.}$$

Так как высота трубы по условию $H = 18$ м, то $H \leq H_{гр}$. Следовательно, источник выброса относится к категории «низкий».

5 Определим доминирующее вещество для промплощадки по формуле (5.14), где для промышленной площадки за ПДК принята величина $0,3\text{ПДК}_{р.з.}$:

$$П_{g1} = \frac{M_1}{0,3 \cdot \text{ПДК}_{р.з.1}} - L = \frac{602,88}{0,3 \cdot 50} - 5,024 \approx 35,168 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$П_{g2} = \frac{M_2}{0,3 \cdot \text{ПДК}_{р.з.2}} - L = \frac{477,28}{0,3 \cdot 200} - 5,024 \approx 2,93 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Так как $П_{g1} > П_{g2}$, то доминирующим веществом на промплощадке является ксилол.

6 Определим формулу расчета концентрации вредного вещества для низкого источника узкого отдельно стоящего здания по таблице 5.2:

$$6H_{зд} = 6 \cdot 15 = 90 \text{ м, } x_{пром} = 64 \text{ м.}$$

Так как $0 < x_{пром} < 6H_{зд}$, воздухозабор приточной вентиляции расположен в пределах единой циркуляционной зоны. Следовательно, ожидаемую концентрацию для доминирующего вещества ксилола $C_{x_{пром}}$ на промплощадке определяем по формуле (5.20):

$$C_{x_{пром}} = \frac{1,3M \cdot k}{v} \left(\frac{0,6}{H_{зд} \cdot l_{зд}} + \frac{42}{(1,4l_{зд} + b_{зд} + x_{пром})^2} \right), \text{ мг/м}^3,$$

где $v = 1$ м/с; так как устье источника выброса находится в пределах единой циркуляционной зоны, то k принимают равным 1.

$$C_{x_{\text{пром}}} = \frac{1,3M \cdot k}{v} \left(\frac{0,6}{H_{\text{зд}} \cdot l_{\text{зд}}} + \frac{42}{(1,4l_{\text{зд}} + b_{\text{зд}} + x_{\text{пром}})^2} \right) =$$

$$= \frac{1,3 \cdot 602,88 \cdot 1}{1} \left(\frac{0,6}{15 \cdot 80} + \frac{42}{(1,4 \cdot 80 + 24 + 64)^2} \right) = 1,215 \text{ мг/м}^3.$$

Приземную концентрацию вредного вещества $C_{\text{пром}}$ в расчетной точке промплощадки определим по формуле (5.47):

$$C_{\text{пром}} = C_{x_{\text{пром}}} + C_{\phi 1} = 1,215 + 0,03 = 1,244 \text{ мг/м}^3.$$

7 Так как $C_{x_{\text{пром}}} + C_{\phi 1} < 0,3\text{ПДК}_{\text{р.з.1}} = 0,3 \cdot 50 = 15 \text{ мг/м}^3$, то нет необходимости в расчете $M_{\text{ПДВ}}$ для промплощадки.

8 Определим доминирующее вещество для низкого источника выброса по формуле (5.14) в жилой зоне, где для населенных пунктов ПДК принята величина $\text{ПДК}_{\text{макс.р.}}$:

$$\Pi_{g1} = \frac{M_1}{\text{ПДК}_{\text{макс.р.1}}} - L = \frac{602,88}{0,2} - 5,024 \approx 3009,376 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$\Pi_{g2} = \frac{M_2}{\text{ПДК}_{\text{макс.р.2}}} - L = \frac{477,28}{0,35} - 5,024 \approx 1358,633 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Следовательно, и для жилой зоны доминирующим веществом остается ксилол.

9 Так как $x_{\text{жз}} = 214 \text{ м}$, $6H_{\text{зд}} = 90 \text{ м}$, то $x_{\text{жз}} > 6H_{\text{зд}}$, следовательно, жилая зона расположена вне единой циркуляционной зоны. Таким образом, ожидаемую концентрацию для доминирующего вещества ксилола в жилой зоне определяем по формуле (5.22):

$$C_{x_{\text{жз}}} = \frac{55M \cdot k}{v(1,4l_{\text{зд}} + b_{\text{зд}} + x_{\text{жз}})^2} = \frac{55 \cdot 602,88 \cdot 1}{1 \cdot (1,4 \cdot 80 + 24 + 214)^2} = 0,271 \text{ мг/м}^3.$$

Приземная концентрацию вредного вещества $C_{жз}$ в расчетной точке жилой зоны равна

$$C_{жз} = C_{x_{жз}} + C_{\phi 1} = 0,271 + 0,03 = 0,301 \text{ мг/м}^3.$$

10 Так как $C_{жз} > \text{ПДК}_{\text{макс.р}}$ ксилола, то необходимо ограничение валового выброса ксилола предельно допустимым уровнем. Величину $M_{\text{ПДВ}}$ для расчетного случая выводим из формулы (5.22), принимая C_x как разницу между максимально разовой предельно допустимой концентрацией доминирующего вещества и его фоновой концентрацией:

$$\begin{aligned} M_{\text{ПДВ}} &= \frac{(\text{ПДК}_{\text{макс.р.1}} - C_{\phi 1}) \cdot v \cdot (1,4l_{\text{зд}} + b_{\text{зд}} + x_{\text{жз}})^2}{55k} = \\ &= \frac{(0,2 - 0,03) \cdot 1 \cdot (1,4 \cdot 80 + 24 + 214)^2}{55 \cdot 1} = 378,636 \text{ мг/с.} \end{aligned}$$

11 Для обеспечения предельно допустимого выброса вредного вещества в жилой зоне производство должно оборудовать систему выброса газоочистной установкой с коэффициентом очистки

$$\eta_0 = 100 \left(1 - \frac{M_{\text{ПДВ}}}{M} \right) = 100 \left(1 - \frac{378,636}{602,88} \right) \approx 37,2 \text{ \%}.$$

Задачи для самостоятельной работы

Задача 5.1. Определить ожидаемую концентрацию вредных веществ в приземном слое воздуха жилого района и при необходимости рассчитать предельно допустимый выброс химических загрязнений и требуемую эффективность газоочистительных установок для обеспечения безвредности атмосферы в жилой зоне при следующих условиях: высота трубы H , м; ее диаметр D , м; высота здания $H_{\text{зд}}$, м, и ширина $b_{\text{зд}}$, м; расстояние от оси трубы до заветренной стороны здания $b_{\text{ист}}$, м. Выбрасываемая газовоздушная смесь имеет температуру $T_{\text{см}}$, °С, и поступает в атмосферу со скоростью $v_{\text{ПГВ}}$, м/с. В составе смеси вещество 1 и вещество 2, содержание которых в выбросе показано концентрацией и фоновой концентрацией вредных веществ соответственно C_{01} , мг/м³ ($C_{\phi 1}$, мг/м³), и C_{02} , мг/м³ ($C_{\phi 2}$, мг/м³). Расстояние от источника выброса (ИВ) до жилых строений (ЖС) $x_{\text{жс}}$, м. Средняя температура воздуха $T_{\text{в}}$, °С. Исходные данные приведены в таблице 5.4.

Задача 5.2. Рассчитать концентрацию вредных веществ в воздухе промплощадки на расстоянии $x_{\text{пром}}$, м, от источника выброса (для пункта воздухозабора приточной вентиляции) и в воздухе прилегающей жилой территории на расстоянии от источника выброса $x_{\text{жз}}$, м, при следующих условиях: источник выброса – труба высотой H , м, и диаметром D , м, расположенная от заветренной стороны здания на расстоянии $b_{\text{ист}}$, м. Источник выброса – отдельно стоящее здание высотой $H_{\text{зд}}$, м, шириной $b_{\text{зд}}$, м, длиной $l_{\text{зд}}$, м. Выбрасываемая газозооушная смесь имеет температуру $T_{\text{см}}$, °C и поступает в атмосферу со скоростью $v_{\text{пгв}}$, м/с. В составе смеси вещество 1 и вещество 2, содержание которых в выбросе показано концентрацией и фоновой концентрацией вредных веществ соответственно C_{01} , мг/м³ ($C_{\text{ф}1}$, мг/м³), и C_{02} , мг/м³ ($C_{\text{ф}2}$, мг/м³). Средняя температура воздуха $T_{\text{в}}$, °C. Исходные данные приведены в таблице 5.5.

Содержание отчета

- 1 Титульный лист.
- 2 Исходные данные в соответствии с вариантом.
- 3 Ход выполнения работы.
- 4 Выводы.

Таблица 5.4 – Исходные данные к задаче 5.1

Параметр и его значение	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Высота трубы H , м	80	40	50	45	58	55	40	50	55	60
Диаметр трубы D , м	1,4	1,5	1,2	1,3	0,9	1,1	1,5	1,0	1,0	1,3
Высота здания $H_{зд}$, м	20	12	14	10	15	12	12	12	15	14
Расстояние от оси трубы до заветренной стороны здания $b_{ист}$, м	10	5	12	9	24	10	6	6	7	10
Ширина здания $b_{зд}$, м	40	22	18	16	30	20	25	25	25	32
Температура выбрасываемой ГВС $T_{см}$, °С	100	120	125	80	90	95	170	180	175	90
Скорость ГВС в устье трубы $v_{ПГВ}$, м/с	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Расстояние от ИВ до ЖЗ $x_{жз}$, м	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600	1700
Температура воздуха $T_{в}$, °С	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Состав выбрасываемой смеси и концентрация вредных веществ C_0 , мг/м ³	Формальдегид: 4,0; Ксилол: 1,2	Акролеин: 0,6; Дихлорэтан: 1,0	Толуол: 0,9; Фенол: 0,6	Бензин: 0,7; Хромовый ангидрид 0,04	Оксид азота: 5,0; Ацетон: 2,0	Сероводород: 0,8; Соляная кислота: 14,0	Оксид углеродная: 6,0; Двуокись азота: 1,0	Формальдегид: 6,0; Ацетон: 2,0	Ангидрид сернистый: 20,0; Ацетон: 1,5	Акролеин: 0,6; Дихлорэтан: 1,0
Фоновая концентрация вредных химических веществ $C_{ф}$, мг/м ³	Формальдегид: 0,01; Ксилол: 0,05	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5	Толуол: 0,15; Фенол: 0,005	Бензин: 1,5; Хромовый ангидрид 0,001	Оксид азота: 0,02; Ацетон: 0,1	Сероводород: 0,001; Соляная кислота: 0,05	Оксид углеродная: 6,0; Двуокись азота: 1,0	Формальдегид: 0,01; Ацетон: 0,1	Ангидрид сернистый: 20,0; Ацетон: 1,5	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5

Продолжение таблицы 5.4

Параметр и его значение	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Высота трубы H , м	65	70	75	80	45	50	55	60	65	70
Диаметр трубы D , м	1,4	1,5	1,5	1,4	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,1
Высота здания $H_{зд}$, м	15	12	18	20	14	16	18	20	10	12
Расстояние от оси трубы до заветренной стороны здания $b_{ист}$, м	12	14	16	15	17	8	9	10	11	14
Ширина здания $b_{зд}$, м	26	20	24	30	35	22	18	16	25	28
Температура выбрасываемой ГВС $T_{см}$, °С	95	170	180	175	120	80	90	100	110	120
Скорость ГВС в устье трубы $v_{ПГВ}$, м/с	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12
Расстояние от ИВ до ЖЗ $x_{жз}$, м	1800	1900	2000	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Температура воздуха T_v , °С	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Состав выбрасываемой смеси и концентрация вредных веществ C_0 , мг/м ³	Толуол: 0,9; Фенол: 0,6	Оксид углеродная: 6,0; Двуокись азота: 1,0	Формальдегид: 6,0; Ацетон: 2,0	Оксид азота: 5,0; Ацетон: 2,0	Сероводород: 0,8; Соляная кислота: 14,0	Формальдегид: 5,0; Ксилол: 1,6	Акролеин: 0,8; Дихлорэтан: 1,2	Толуол: 1,9; Фенол: 1,6	Бензин: 1,7; Хромовый ангидрид: 0,3	Оксид азота: 5,0; Ацетон: 2,0
Фоновая концентрация вредных химических веществ C_f , мг/м ³	Толуол: 0,15; Фенол: 0,005	Оксид углеродная: 0,02; Двуокись азота: 0,02	Формальдегид: 0,01; Ацетон: 0,1	Оксид азота: 0,02; Ацетон: 0,1	Сероводород: 0,001; Соляная кислота: 0,05	Формальдегид: 0,01; Ксилол: 0,05	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5	Толуол: 0,15; Фенол: 0,005	Бензин: 1,5; Хромовый Ангидрид: 0,001	Оксид азота: 0,02; Ацетон: 0,1

Продолжение таблицы 5.4

Параметр и его значение	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Высота трубы H , м	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Диаметр трубы D , м	1,4	1,5	1,2	1,3	0,9	1,1	1,5	1,0	1,0	1,3
Высота здания $H_{зд}$, м	14	16	18	20	22	24	8	10	12	14
Расстояние от оси трубы до заветренной стороны здания $b_{ист}$, м	15	17	6	8	10	12	11	14	15	16
Ширина здания $b_{зд}$, м	40	22	18	16	30	20	25	25	25	32
Температура выбрасываемой ГВС $T_{см}$, °С	100	120	125	80	90	95	170	180	175	90
Скорость ГВС в устье трубы $v_{ПГВ}$, м/с	13	14	15	16	8	9	10	11	12	13
Расстояние от ИВ до ЖЗ $x_{жз}$, м	1500	1600	1700	1800	1900	2000	800	900	1000	1100
Температура воздуха T_v , °С	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Состав выбрасываемой смеси и концентрация вредных веществ C_0 , мг/м ³	Формальдегид: 4,0; Ксилол: 1,2	Акролеин: 0,6; Дихлорэтан: 1,0	Толуол: 0,9; Фенол: 0,6	Бензин: 0,7; Хромовый ангидрид 0,04	Окись азота: 5,0; Ацетон: 2,0	Сероводород: 0,8; Соляная кислота: 14,0	Окись углеродная: 6,0; Двуокись азота: 1,0	Формальдегид: 6,0; Ацетон: 2,0	Ангидрид сернистый: 20,0; Ацетон: 1,5	Акролеин: 0,6; Дихлорэтан: 1,0
Фоновая концентрация вредных химических веществ C_f , мг/м ³	Формальдегид: 0,01; Ксилол: 0,05	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5	Толуол: 0,15; Фенол: 0,005	Бензин: 1,5; Хромовый ангидрид 0,001	Окись азота: 0,02; Ацетон: 0,1	Сероводород: 0,001; Соляная кислота: 0,05	Окись углеродная: 0,02; Двуокись азота: 0,02	Формальдегид: 0,01; Ацетон: 0,1	Ангидрид сернистый: 0,01; Ацетон: 0,01	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5

Таблица 5.5 – Исходные данные к задаче 5.2

Параметр и его значение	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Высота трубы H , м	14	16	18	20	22	24	10	12	14	16
Диаметр трубы D , м	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Высота здания $H_{зд}$, м	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
Расстояние $b_{ист}$, м	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Ширина здания $b_{зд}$, м	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
Длина здания $l_{зд}$, м	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Температура выбрасываемой ГВС $T_{см}$, °C	54	68	79	82	93	107	114	129	134	141
Скорость ГВС в устье трубы $v_{ПГВ}$, м/с	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Расстояние от ИВ до промплощадки $x_{пром}$, м	52	63	74	85	96	101	114	123	134	145
Расстояние от ИВ до ЖЗ $x_{жз}$, м	320	380	440	580	610	670	705	735	830	880
Температура воздуха $T_{в}$, °C	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Состав выбрасываемой смеси и концентрация вредных веществ C_0 , мг/м ³	Формальдегид: 4,0; Ксилол: 1,2	Акролеин: 0,6; Дихлорэтан: 1,0	Толуол: 0,9; Фенол: 0,6	Бензин: 0,7; Хромовый ангидрид 0,04	Окись азота: 5,0; Ацетон: 2,0	Сероводород: 0,8; Соляная кислота: 14,0	Окись углерода 6,0; Двуокись азота: 1,0	Формальдегид: 6,0; Ацетон: 2,0	Ангидрид сернистый: 20,0; Ацетон: 1,5	Акролеин: 0,6; Дихлорэтан: 1,0
Фоновая концентрация вредных химических веществ $C_{ф}$, мг/м ³	Формальдегид: 0,01; Ксилол: 0,05	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5	Толуол: 0,15; Фенол: 0,005	Бензин: 1,5; Хромовый ангидрид 0,001	Окись азота: 0,02; Ацетон: 0,1	Сероводород: 0,001; Соляная кислота: 0,05	Окись углерода 0,02; Двуокись азота: 0,02	Формальдегид: 0,01; Ацетон: 0,1	Ангидрид сернистый: 0,01; Ацетон: 0,01	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5

Продолжение таблицы 5.5

Параметр и его значение	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Высота трубы H , м	65	70	75	80	45	50	55	60	65	70
Диаметр трубы D , м	1,4	1,5	1,5	1,4	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,1
Высота здания $H_{зд}$, м	15	12	18	20	14	16	18	20	10	12
Расстояние $b_{ист}$, м	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Ширина здания $b_{зд}$, м	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
Длина здания $l_{зд}$, м	54	68	74	82	90	150	170	190	220	250
Температура выбрасываемой ГВС $T_{см}$, °С	95	170	180	175	120	80	90	100	110	120
Скорость ГВС в устье трубы $v_{ПГВ}$, м/с	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12
Расстояние от ИВ до промплощадки $x_{пром}$, м	220	310	430	85	92	140	460	620	710	630
Расстояние от ИВ до ЖЗ $x_{жз}$, м	1800	1900	2000	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
Температура воздуха T_v , °С	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Состав выбрасываемой смеси и концентрация вредных веществ C_0 , мг/м ³	Толуол: 0,9; Фенол: 0,6	Оксид углеродная: 6,0; Двуокись азота: 1,0	Формальдегид: 6,0; Ацетон: 2,0	Оксид азота: 5,0; Ацетон: 2,0	Сероводород: 0,8; Соляная кислота: 14,0	Формальдегид: 5,0; Ксилол: 1,6	Акролеин: 0,8; Дихлорэтан: 1,2	Толуол: 1,9; Фенол: 1,6	Бензин: 1,7; Хромовый ангидрид 0,3	Оксид азота: 5,0; Ацетон: 2,0
Фоновая концентрация вредных химических веществ C_f , мг/м ³	Толуол: 0,15; Фенол: 0,005	Оксид углеродная: 0,02; Двуокись азота: 0,02	Формальдегид: 0,01; Ацетон: 0,1	Оксид азота: 0,02; Ацетон: 0,1	Сероводород: 0,001; Соляная кислота: 0,05	Формальдегид: 0,01; Ксилол: 0,05	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5	Толуол: 0,15; Фенол: 0,005	Бензин: 1,5; Хромовый ангидрид 0,001	Оксид азота: 0,02; Ацетон: 0,1

Продолжение таблицы 5.5

Параметр и его значение	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Высота трубы H , м	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Диаметр трубы D , м	1,4	1,5	1,2	1,3	0,9	1,1	1,5	1,0	1,0	1,3
Высота здания $H_{зд}$, м	14	16	18	20	22	24	8	10	12	14
Расстояние $b_{ист}$, м	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
Ширина здания $b_{зд}$, м	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56
Длина здания $l_{зд}$, м	54	68	74	82	90	150	170	190	220	250
Температура выбрасываемой ГВС $T_{см}$, °C	64	58	76	82	91	106	114	124	156	137
Скорость ГВС в устье трубы $v_{ПГВ}$, м/с	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12
Расстояние от ИВ до промплощадки $x_{пром}$, М	54	62	74	80	81	44	57	93	100	123
Расстояние от ИВ до ЖЗ $x_{жз}$, М	132	143	147	169	155	170	133	231	305	300
Температура воздуха T_v , °C	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
Состав выбрасываемой смеси и концентрация вредных веществ C_0 , мг/м ³	Формальдегид: 4,0; Ксилол: 1,2	Акролеин: 0,6; Дихлорэтан: 1,0	Толуол: 0,9; Фенол: 0,6	Бензин: 0,7; Хром. Ангидрид: 0,04	Окись азота: 5,0; Ацетон: 2,0	Сероводород: 0,8; Соляная кислота: 14,0	Окись углерода 6,0; Двуокись азота: 1,0	Формальдегид: 6,0; Ацетон: 2,0	Ангидрид сернистый: 20,0; Ацетон: 1,5	Акролеин: 0,6; Дихлорэтан: 1,0
Фоновая концентрация вредных химических веществ C_f , мг/м ³	Формальдегид: 0,01; Ксилол: 0,05	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5	Толуол: 0,15; Фенол: 0,005	Бензин: 1,5; Хром. Ангидрид: 0,001	Окись азота: 0,02; Ацетон: 0,1	Сероводород: 0,001; Соляная кислота: 0,05	Окись углерода 0,02; Двуокись азота: 0,02	Формальдегид: 0,01; Ацетон: 0,1	Ангидрид сернистый: 0,01; Ацетон: 0,01	Акролеин: 0,02; Дихлорэтан: 0,5

Контрольные вопросы

- 1 По каким признакам подразделяют выбросы загрязняющих веществ в атмосферу?
- 2 Какие различают выбросы загрязняющих веществ по виду источников?
- 3 Какие различают выбросы загрязняющих веществ по температуре пылегазовоздушной смеси?
- 4 Какие различают выбросы загрязняющих веществ по высоте?
- 5 Какие различают выбросы загрязняющих веществ по форме выбросных устройств?
- 6 Что называют предельно допустимым выбросом вредного вещества в атмосферу?
- 7 Какая величина принята за допустимый уровень загрязненности воздуха для жилых зон?
- 8 Какая величина принята за допустимый уровень загрязненности воздуха для промышленных площадок?
- 9 Назовите основные методы и средства обеспечения предельно допустимых выбросов вредных веществ на производстве.
- 10 Назовите способы очистки газовых выбросов в атмосферу.

Список использованных источников

- 1 Руководство по расчету загрязнения воздуха на промышленных площадках. – М. : Стройиздат, 1977. – 74 с.
- 2 ОНД-86 Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятия. – Введ. 1987–01–01. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 93 с.
- 3 Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе : приказ М-ва природ. ресурсов и экологии Рос. Федерации от 6 июля 2017 г. № 273 // КонсультантПлюс. Россия : справ. правовая система.
- 4 Шакиров, Р. С. Инженерные методы защиты окружающей среды по курсу «Охрана труда и окружающей среды» метод. пособие для студентов всех радиотех. спец. / Р. С. Шакиров, Т. Ф. Михнюк, Г. М. Дунаева. – Минск : МРТИ, 1985. – 73 с.

Тема 6. Оценка надежности технических систем

Цель: формирование у студентов знаний и навыков оценки надежности технических систем.

План занятия:

- 1 Изучить теорию.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.
- 4 Оформить отчет.

Теоретические сведения

Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Можно отметить, что надежность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать в себя свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, а также определенное сочетание этих свойств.

Критерием надежности называется признак (мера), по которому (которой) оценивается надежность различных объектов (изделий). Критерии представляются в виде показателей надежности, свойств безотказности, долговечности, ремонтпригодности, сохраняемости и др.

К числу наиболее широко применяемых критериев надежности относятся *показатели безотказности*:

- вероятность безотказной работы в течение определенного времени $P(t)$;
- гамма-процентная наработка до отказа t_γ ;
- средняя наработка до отказа T_1 (для статистических задач $\bar{T}_1$);
- средняя наработка на отказ T (для статистических задач $\bar{T}$);
- частота отказов $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- параметр потока отказов $\mu(t)$ и др.

Характеристикой надежности называется количественное значение критерия надежности конкретного изделия.

Выбор количественных характеристик надежности зависит от вида изделия.

Основные критерии надежности делят на две группы:

- критерии, характеризующие надежность невосстанавливаемых изделий;
- критерии, характеризующие надежность восстанавливаемых изделий.

Рассмотрим критерии надежности невосстанавливаемых изделий.

Пусть на испытании находится N_0 объектов, и пусть испытания считаются законченными, если все они отказали. Вместо отказавших образцов отремонтированные или новые не ставятся. В таких случаях критериями надежности изделий являются:

- вероятность безотказной работы $P(t)$;
- частота отказов $f(t)$;
- интенсивность отказов $\lambda(t)$;
- средняя наработка до отказа T_1 (в некоторых источниках $T_{ср}$).

Вероятностью безотказной работы (ВБР) называется количественная мера того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени или в пределах заданной наработки не произойдет ни одного отказа.

Функция P – относительная продолжительность непрерывной исправной работы объекта до первого отказа, а *аргумент t* – время, за которое нужно определить ВБР:

$$P(t) = P(T \geq t), \quad t \geq 0, \quad (6.1)$$

где T – время работы объекта от начала до первого отказа;

t – время, в течение которого определяется вероятность безотказной работы.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным $\hat{P}(t)$ об отказах оценивается выражением

$$\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (6.2)$$

где $\hat{P}(t)$ – статистическая оценка вероятности безотказной работы;

N_0 – число объектов в начале работы (серии испытаний);

$n(t)$ – число отказавших элементов за время t .

Кроме ВБР, определяют такую характеристику, как вероятность отказа.

Вероятностью отказа $Q(t)$ называется количественная мера того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникает хотя бы один отказ.

Отказ и безотказная работа являются событиями несовместными и противоположными, поэтому при $0 \leq t$

$$Q(t) = P(T < t), \quad Q(t) = 1 - P(t) = F(t), \quad (6.3)$$

где $Q(t)$ – интегральная функция распределения случайной величины $Q(t) = F(t)$.

Статистически вероятность отказа равна

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (6.4)$$

$$\hat{Q}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0},$$

где n_i – число неблагоприятных исходов;

N_0 – общее число испытаний.

Если функция $Q(t)$ дифференцируема, то производная от интегральной функции распределения – дифференциальный закон (плотность вероятности, плотность распределения) случайной величины T – времени безотказной работы:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dP(t)}{dt}. \quad (6.5)$$

Частотой отказов по статистическим данным $\hat{f}(t)$ называется отношение числа отказавших элементов в единицу времени к первоначальному числу работающих (испытываемых) при условии, что все вышедшие из строя изделия не восстанавливаются. Согласно определению

$$\hat{f}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t} \text{ или } \alpha(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (6.6)$$

где $n(\Delta t)$ – число отказавших элементов в интервале времени от $(t - \Delta t)/2$ до $(t + \Delta t)/2$.

Частота отказов $f(t)$ есть плотность вероятности (или закон распределения) времени работы изделия до первого отказа. Поэтому

$$f(t) = -\frac{dP}{dt} = -P'(t) = \frac{dQ(t)}{dt} Q'(t),$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt, \quad (6.7)$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt. \quad (6.8)$$

Интенсивностью отказов по статистическим данным $\hat{\lambda}(t)$ называется отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу изделий, исправно работающих в данный отрезок времени:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{\text{ср}}\Delta t}, \quad (6.9)$$

где $N_{\text{ср}}$ – среднее число исправно работающих изделий в интервале Δt ;
 $N_{\text{ср}} = (N_i + N_{i+1})/2$;

N_i – число изделий, исправно работающих в начале интервала Δt ;

N_{i+1} – число изделий, исправно работающих в конце интервала Δt .

Интенсивность отказов в вероятностной оценке $\lambda(t)$ есть условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник.

Вероятностная оценка характеристики находится из выражения

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (6.10)$$

или

$$f(t) = \lambda(t)P(t).$$

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (6.11)$$

Средней наработкой до первого отказа называется математическое ожидание времени работы объекта до отказа.

Математическое ожидание средней наработки до отказа T_1 вычисляется через частоту отказов (плотность распределения времени безотказной работы):

$$m_t = T_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt. \quad (6.12)$$

Зная, что $t > 0$ и $P(0) = 1$, а $P(\infty) = 0$, определяют T_1 :

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (6.13)$$

Средняя наработка до первого отказа $\hat{T}_1$, согласно статистическим данным об отказах, вычисляется по формуле

$$\hat{T}_1 = \left(\sum_{i=1}^m n_i t_i \right) / N_0, \quad (6.14)$$

где t_i – время безотказной работы i -го образца;

N_0 – число испытываемых объектов.

Для определения *средней наработки до первого отказа* необходимо знать моменты выхода из строя всех испытываемых объектов. Поэтому для вычисления $\hat{T}_1$ пользоваться данной формулой неудобно. Имея данные о количестве вышедших из строя элементов n_i в каждом i -м интервале времени, среднюю наработку до первого отказа лучше определять по уравнению

$$\hat{T}_1 \approx \left(\sum_{i=1}^m n_i t_{cp} \right) / N_0, \quad (6.15)$$

где t_{cp} и m находятся по следующим формулам:

$$t_{\text{cp}} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}, \quad m = \frac{t_k}{\Delta t}, \quad (6.16)$$

где t_{i-1} – время начала i -го интервала;

t_i – время конца i -го интервала;

t_k – время, в течение которого вышли из строя все элементы;

Δt – интервал времени $\Delta t = t_{i-1} - t_i$.

Пример решения задачи

Задача. В результате наблюдений за 45 образцами радиоэлектронного оборудования, которые прошли предварительную 70-часовую приработку, получены данные до первого отказа всех 45 образцов. Определить вероятность безотказной работы $P(t)$, частоту отказов $f(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$ в функции времени, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа T_{cp} . В таблице 6.1 приведены сведения по отказам за указанный промежуток времени.

Таблица 6.1 – Исходные данные

$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–10	19	40–50	0
10–20	13	50–60	1
20–30	8	60–70	1
30–40	3	–	–

Решение

Рассчитаем вероятность безотказной работы $P(t)$ по формуле (6.2) для каждого промежутка времени:

$$P(10) = \frac{45 - 19}{45} = 0,58; \quad P(20) = \frac{45 - 32}{45} = 0,29;$$

$$P(30) = \frac{45 - 40}{45} = 0,11; \quad P(40) = \frac{45 - 43}{45} = 0,04;$$

$$P(50) = \frac{45 - 43}{45} = 0,04; \quad P(60) = \frac{45 - 44}{45} = 0,02;$$

$$P(70) = \frac{45 - 45}{45} = 0.$$

Рассчитаем частоту отказов $f(t)$ по формуле (6.6) в интервале времени:

$$f(t) = \frac{19}{45 \cdot (10 - 0)} = 0,042; \quad f(t) = \frac{13}{45 \cdot (20 - 10)} = 0,029;$$

$$f(t) = \frac{8}{45 \cdot (30 - 20)} = 0,018; \quad f(t) = \frac{3}{45 \cdot (40 - 30)} = 0,007;$$

$$f(t) = \frac{0}{45 \cdot (50 - 40)} = 0; \quad f(t) = \frac{1}{45 \cdot (60 - 50)} = 0,002;$$

$$f(t) = \frac{1}{45 \cdot (70 - 60)} = 0,002.$$

Рассчитаем интенсивность отказов $\lambda(t)$ по формуле (6.9):

$$\lambda(t) = \frac{19}{\left(\frac{45 + 26}{2}\right) \cdot 10} = 0,0535; \quad \lambda(t) = \frac{13}{\left(\frac{26 + 13}{2}\right) \cdot 10} = 0,0667;$$

$$\lambda(t) = \frac{8}{\left(\frac{13 + 5}{2}\right) \cdot 10} = 0,0889; \quad \lambda(t) = \frac{3}{\left(\frac{5 + 2}{2}\right) \cdot 10} = 0,0857;$$

$$\lambda(t) = \frac{0}{\left(\frac{2 + 2}{2}\right) \cdot 10} = 0; \quad \lambda(t) = \frac{1}{\left(\frac{2 + 1}{2}\right) \cdot 10} = 0,0667;$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{\left(\frac{1 + 0}{2}\right) \cdot 10} = 0,2.$$

Полученные данные сведем в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Полученные данные

$\Delta t_i, \text{ч}$	$P(t)$	$f(t) = \alpha(t)$	$\lambda(t), \text{ч}$
0–10	0,58	0,042	0,0535
10–20	0,29	0,029	0,0667
20–30	0,11	0,018	0,0889
30–40	0,04	0,007	0,857
40–50	0,04	0	0
50–60	0,02	0,002	0,0667
60–70	0	0,002	0,2

Находим среднюю наработку до первого отказа по формуле (6.15).
Учитывая, что в данном случае

$$m = \frac{t_k}{\Delta t} = \frac{70}{10} = 7; \quad N_0 = 45,$$

имеем

$$T_{\text{ср}} = \frac{19 \cdot 5 + 13 \cdot 15 + 8 \cdot 25 + 3 \cdot 35 + 0 \cdot 45 + 1 \cdot 55 + 1 \cdot 65}{45} = 15,89 \text{ ч.}$$

Построим графики функций вероятности безотказной работы $P(t)$ (рисунок 6.1), частоты отказов $f(t)$ (рисунок 6.2), интенсивности отказов $\lambda(t)$ (рисунок 6.3).

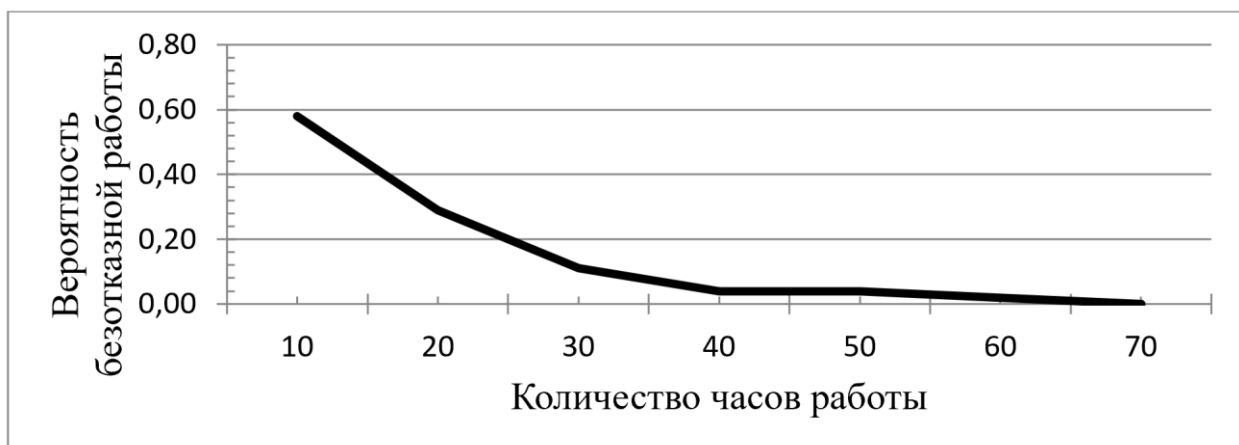


Рисунок 6.1 – Вероятность безотказной работы $P(t)$

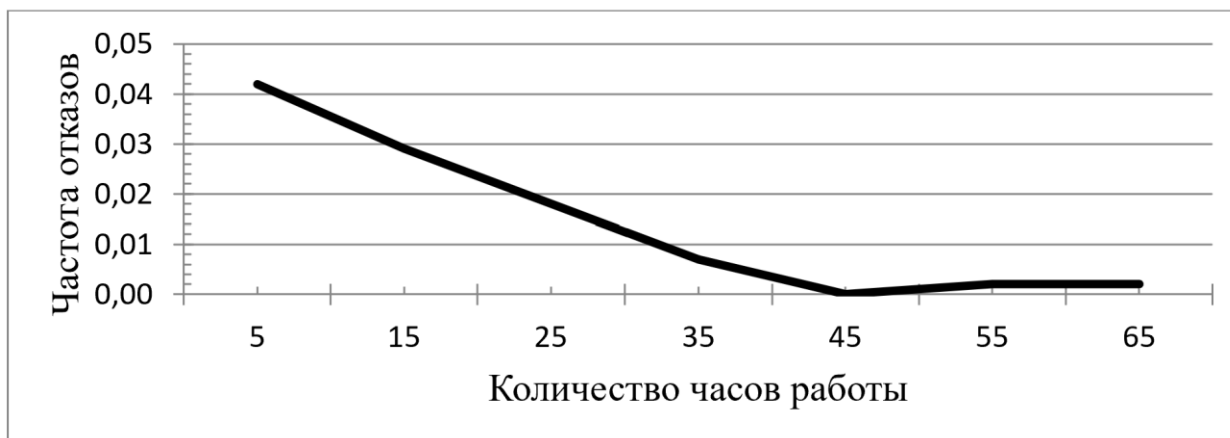


Рисунок 6.2 – Частота отказов $f(t)$

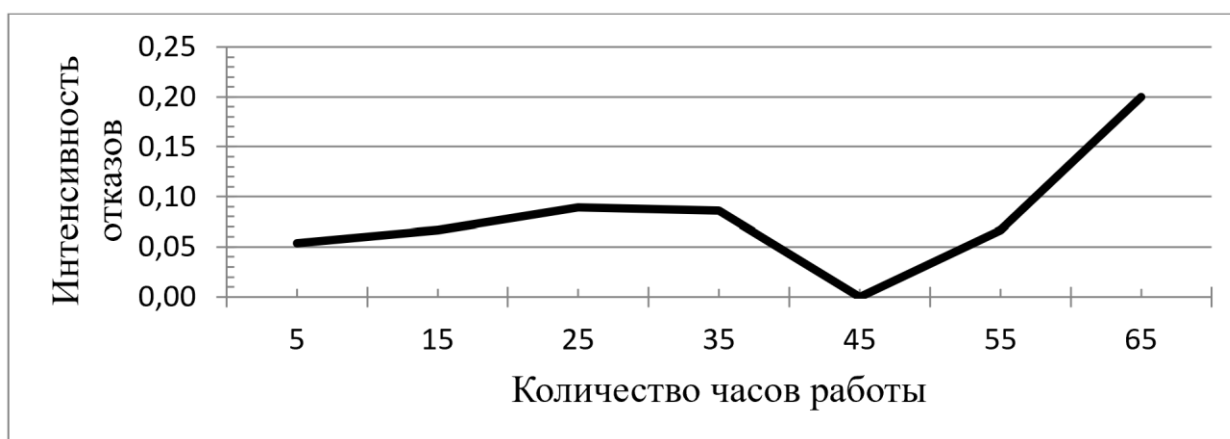


Рисунок 6.3 – Интенсивность отказов $\lambda(t)$

Вывод. Таким образом, средняя наработка до первого отказа составила 15,89 ч. Интенсивность отказов за период 70 ч испытания при условии, что отказавшие изделия не восстанавливались и не заменялись новыми, составила 0,2 ч⁻¹. Вероятность безотказной работы для первых 10 ч составила 58 %, далее каждые 10 ч вероятность безотказной работы падала: 29; 11; 4; 4; 2 и 0 %. Частота отказов за период испытания 70 ч составила 0,002 ч⁻¹.

Задача для самостоятельной работы

На испытание поставлено X элементов. Число отказов фиксировалось в каждом интервале времени испытаний Δt . Требуется определить вероятность безотказной работы, частоту отказов и интенсивность отказов в функции времени, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа элементов. В таблице 6.3 приведены сведения для каждого варианта по отказам за указанный промежуток времени.

Таблица 6.3 – Исходные данные

Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
$X = 140$		$X = 150$		$X = 175$		$X = 190$		$X = 120$	
$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–5	22	0–25	25	0–15	26	0–10	27	0–20	17
5–10	19	25–50	23	15–30	21	10–20	23	20–40	15
10–15	16	50–75	19	30–45	17	20–30	26	40–60	12
15–20	14	75–100	17	45–60	20	30–40	20	60–80	9
20–25	12	100–125	15	60–75	16	40–50	18	80–100	7
25–30	9	125–150	13	75–90	14	50–60	15	100–120	4
30–35	6	150–175	9	90–105	11	60–70	11	120–140	6
35–40	5	175–200	8	105–120	9	70–80	9	140–160	9
40–45	4	200–225	2	120–135	6	80–90	7	160–180	7
45–50	2	225–250	5	135–150	0	90–100	4	180–200	4
50–55	1	250–275	3	150–165	2	100–110	2	200–220	4
55–60	0	275–300	2	165–180	3	110–120	1	220–240	5
60–65	1	300–325	1	180–195	1	120–130	0	240–260	3
65–70	1	350–375	2	195–210	3	130–140	1	260–280	1

Продолжение таблицы 6.3

Вариант 6		Вариант 7		Вариант 8		Вариант 9		Вариант 10	
$X = 220$		$X = 180$		$X = 260$		$X = 270$		$X = 100$	
$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–50	43	0–5	19	0–35	33	0–5	28	0–15	16
50–100	31	5–10	16	35–70	27	5–10	26	15–30	14
100–150	28	10–15	11	70–105	25	10–15	27	30–45	13
150–200	25	15–20	9	105–140	28	15–20	24	45–60	11
200–250	22	20–25	7	140–175	23	20–25	21	60–75	9
250–300	18	25–30	6	175–210	18	25–30	18	75–90	7
300–350	15	30–35	9	210–245	15	30–35	15	90–105	5
350–400	12	35–40	6	245–280	13	35–40	14	105–120	3
400–450	9	40–45	4	280–315	12	40–45	12	120–135	0
450–500	7	45–50	5	315–350	10	45–50	9	135–150	3
500–550	0	50–55	3	350–385	7	50–55	6	150–165	2
550–600	3	55–60	2	385–420	5	55–60	4	165–180	1
600–650	2	60–65	1	420–455	3	60–65	2	180–195	1
650–700	1	65–70	1	455–490	2	65–70	1	195–210	1

Продолжение таблицы 6.3

Вариант 11		Вариант 12		Вариант 13		Вариант 14		Вариант 15	
$X = 160$		$X = 230$		$X = 240$		$X = 270$		$X = 250$	
$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–5	16	0–25	28	0–15	27	0–10	33	0–20	28
5–10	14	25–50	26	15–30	23	10–20	27	20–40	26
10–15	13	50–75	27	30–45	21	20–30	25	40–60	27
15–20	11	75–100	24	45–60	20	30–40	28	60–80	24
20–25	9	100–125	21	60–75	18	40–50	23	80–100	21
25–30	7	125–150	18	75–90	15	50–60	18	100–120	18
30–35	5	150–175	15	90–105	11	60–70	15	120–140	15
35–40	3	175–200	14	105–120	9	70–80	13	140–160	14
40–45	0	200–225	12	120–135	7	80–90	12	160–180	12
45–50	3	225–250	11	135–150	4	90–100	10	180–200	11
50–55	2	250–275	9	150–165	2	100–110	7	200–220	9
55–60	1	275–300	8	165–180	1	110–120	5	220–240	8
60–65	1	300–325	2	180–195	1	120–130	3	240–260	2
65–70	1	325–350	1	195–210	1	130–140	2	260–280	1

Продолжение таблицы 6.3

Вариант 16		Вариант 17		Вариант 18		Вариант 19		Вариант 20	
$X = 240$		$X = 250$		$X = 275$		$X = 390$		$X = 420$	
$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–15	23	0–25	25	0–15	26	0–10	27	0–20	17
15–30	17	25–50	23	15–30	21	10–20	23	20–40	15
30–45	15	50–75	19	30–45	17	20–30	26	40–60	12
45–60	18	75–100	17	45–60	20	30–40	20	60–80	9
60–75	13	100–125	15	60–75	16	40–50	18	80–100	7
75–90	8	125–150	13	75–90	14	50–60	15	100–120	4
90–105	5	150–175	9	90–105	11	60–70	11	120–140	6
105–120	3	175–200	8	105–120	9	70–80	9	140–160	9
120–135	2	200–225	2	120–135	6	80–90	7	160–180	7
135–150	3	225–250	5	135–150	0	90–100	4	180–200	4
150–165	7	250–275	3	150–165	2	100–110	2	200–220	4
165–180	5	275–300	2	165–180	3	110–120	1	220–240	5
180–195	3	300–325	1	180–195	1	120–130	0	240–260	3
195–210	2	325–350	2	195–210	3	130–140	1	260–280	1

Продолжение таблицы 6.3

Вариант 21		Вариант 22		Вариант 23		Вариант 24		Вариант 25	
$X = 420$		$X = 580$		$X = 560$		$X = 470$		$X = 364$	
$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–50	43	0–5	19	0–35	33	0–5	28	0–15	16
50–100	31	5–10	16	35–70	27	5–10	26	15–30	14
100–150	28	10–15	11	70–105	25	10–15	27	30–45	13
150–200	25	15–20	9	105–140	28	15–20	24	45–60	11
200–250	22	20–25	7	140–175	23	20–25	21	60–75	9
250–300	18	25–30	6	175–210	18	25–30	18	75–90	7
300–350	15	30–35	9	210–245	15	30–35	15	90–105	5
350–400	12	35–40	6	245–280	13	35–40	14	105–120	3
400–450	9	40–45	4	280–315	12	40–45	12	120–135	0
450–500	7	45–50	5	315–350	10	45–50	9	135–150	3
500–550	0	50–55	3	350–385	7	50–55	6	150–165	2
550–600	3	55–60	2	385–420	5	55–60	4	165–180	1
600–650	2	60–65	1	420–455	3	60–65	2	180–195	1
650–700	1	65–70	1	455–490	2	65–70	1	195–210	1

Продолжение таблицы 6.3

Вариант 26		Вариант 27		Вариант 28		Вариант 29		Вариант 30	
$X = 264$		$X = 438$		$X = 530$		$X = 630$		$X = 330$	
$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
0–5	16	0–25	28	0–15	17	0–50	23	0–20	28
5–10	14	25–50	26	15–30	13	50–100	17	20–40	26
10–15	13	50–75	27	30–45	11	100–150	15	40–60	27
15–20	11	75–100	24	45–60	20	150–200	18	60–80	24
20–25	9	100–125	21	60–75	8	200–250	13	80–100	21
25–30	7	125–150	18	75–90	5	250–300	18	100–120	18
30–35	5	150–175	15	90–105	1	300–350	15	120–140	15
35–40	3	175–200	14	105–120	4	350–400	13	140–160	14
40–45	0	200–225	12	120–135	7	400–450	12	160–180	12
45–50	3	225–250	11	135–150	4	450–500	10	180–200	11
50–55	2	250–275	9	150–165	2	500–550	7	200–220	9
55–60	1	275–300	8	165–180	1	550–600	5	220–240	8
60–65	1	300–325	2	180–195	1	600–650	3	240–260	2
65–70	1	325–350	1	195–210	1	650–700	2	260–280	1

Содержание отчета

- 1 Титульный лист.
- 2 Исходные данные в соответствии с вариантом.
- 3 Ход выполнения работы.
- 4 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое надежность?
- 2 Что такое критерий надежности?
- 3 В виде каких показателей представляются критерии надежности различных объектов (изделий)?
- 4 Какие показатели безотказности относят к широко применяемым критериям надежности?
- 5 На какие группы подразделяют основные критерии надежности?
- 6 Что называют вероятностью безотказной работы?
- 7 Что такое вероятность отказа?
- 8 Что такое частота отказов?
- 9 Что понимают под средней наработкой до первого отказа?
- 10 Что такое интенсивность отказа?

Список использованных источников

- 1 Белов, П. Г. Управление рисками, системный анализ и моделирование : учеб. и практикум : в 3 ч. Ч. 1 / П. Г. Белов. – М. : Юрайт, 2022. – 211 с.
- 2 ГОСТ 27.002–89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1990–07–01. – Минск : БелГИСС, 1990. – 36 с.
- 3 Щербина, Н. В. Основы промышленной безопасности : учеб.-метод. пособие / Н. В. Щербина, В. С. Осипович, К. Д. Яшин. – Минск : БГУИР, 2016. – 95 с.

Учебное издание

Щербина Наталья Витальевна
Осипович Виталий Семенович
Яшин Константин Дмитриевич

ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ. ПРАКТИКУМ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

2-е издание, дополненное и пересмотренное

Редактор *А. Ю. Шурко*
Компьютерная правка, оригинал-макет *А. А. Лущикова*

Подписано в печать 28.07.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 9,65. Уч.-изд. л. 10,1. Тираж 50 экз. Заказ 20.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск