

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

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия
для направления специальности
1-40 05 01-09 «Информационные системы и технологии
(в обеспечении промышленной безопасности)»*

Минск БГУИР 2016

УДК 331.45:658.5(076)
ББК 65.247+30.606я73
Щ64

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра охраны труда Белорусского национального технического университета
(протокол №8 от 27.03.2015);

заведующий лабораторией компьютерной графики
государственного научного учреждения «Объединенный институт
проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»,
кандидат технических наук, доцент В. В. Ткаченко

Щербина, Н. В.

Щ64 Основы промышленной безопасности : учеб.-метод. пособие /
Н. В. Щербина, В. С. Осипович, К. Д. Яшин. – Минск : БГУИР, 2016. –
95 с. : ил.

ISBN 978-985-543-203-7.

Учебно-методическое пособие посвящено вопросам исследования, анализа и последующего расчета надежности технических систем, оценки безопасных условий труда на опасных производственных объектах. В качестве объекта исследования рассматривается система «человек – машина – среда».

УДК 331.45:658.5(076)
ББК 65.247+30.606я73

ISBN 978-985-543-203-7

© Щербина Н. В., Осипович В. С.,
Яшин К. Д., 2016
© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Тема 1 Исследование надежности технических систем.....	5
Тема 2 Исследование безопасности технических систем с помощью дерева отказов.....	15
Тема 3 Анализ развития аварийной ситуации с помощью дерева событий.....	31
Тема 4 Взрывопожаробезопасность на производстве.....	37
Тема 5 Определение безопасных условий использования баллонов с горючим газом.....	46
Тема 6 Оценка обстановки при авариях на химически опасных объектах	54
Приложение А Пример оформления титульного листа отчета	93
Список литературы.....	94

ВВЕДЕНИЕ

Промышленная безопасность опасных производственных объектов (далее промышленная безопасность) – 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 задача промышленной безопасности – путем осуществления разноплановых мероприятий свести к минимуму возникновение аварий на опасных производственных объектах.

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 Исследование надежности технических систем

Цель: формирование у студентов знаний и навыков оценки надежности технических систем.

План занятия:

- 1 Изучить теорию вопроса.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.

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_{cp}).

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:

$$P(t) = P(T \geq t), \quad t \geq 0, \quad (1.1)$$

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

$$\hat{P}(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (1.2)$$

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 $0 \leq t$

$$Q(t) = P(T < t), \quad Q(t) = 1 - P(t) = F(t), \quad (1.3)$$

где $Q(t)$ – интегральная функция распределения случайной величины ($Q(t) == F(t)$).

Статистически вероятность отказа равна:

$$\hat{Q}(t) = \frac{n(t)}{N_0}, \quad (1.4)$$

$$\hat{Q}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0},$$

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:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.5)$$

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

$$\hat{f}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t} \text{ или } \alpha(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_0 \Delta t}, \quad (1.6)$$

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

$$f(t) = -\frac{dP}{dt} = -P'(t) = \frac{dQ(t)}{dt} Q'(t),$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt, \quad (1.7)$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt. \quad (1.8)$$

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:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp}\Delta t}, \quad (1.9)$$

где N_{cp} – среднее число исправно работающих изделий в интервале Δt ($N_{cp} = (N_i + N_{i+1})/2$);

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

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} \quad (1.10)$$

или

$$f(t) = \lambda(t)P(t).$$

Интенсивность отказов и вероятность безотказной работы связаны между собой зависимостью

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \quad (1.11)$$

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):

$$m_t = T_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} tf(t)dt. \quad (1.12)$$

Зная, что $t > 0$ и $P(0) = 1$, а $P(\infty) = 0$, определяют T_1 :

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t)dt. \quad (1.13)$$

Средняя наработка до первого отказа \hat{T}_1 , согласно статистическим данным об отказах, вычисляется по формуле

$$\hat{T}_1 = \left(\sum_{i=1}^m n_i t_i \right) / N_0, \quad (1.14)$$

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

$$\hat{T}_1 \approx \left(\sum_{i=1}^m n_i t_{cp} \right) / N_0, \quad (1.15)$$

где t_{cp} и m находятся по следующим формулам:

$$t_{cp} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}, \quad m = \frac{t_k}{\Delta t}, \quad (1.16)$$

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 $f(t)$, вероятность отказов $\lambda(t)$ в функции времени, построить графики этих функций, а также найти среднюю наработку до первого отказа (T_{cp}). В таблице 1.1 приведены сведения по отказам за указанный промежуток времени.

Таблица 1.1 – 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 (1.2) 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 (1.6) в интервале времени:

$$f(t) = \frac{19}{45 \times (10 - 0)} = 0,084; \quad f(t) = \frac{13}{45 \times (20 - 10)} = 0,029;$$

$$f(t) = \frac{8}{45 \times (30 - 20)} = 0,018; \quad f(t) = \frac{3}{45 \times (40 - 30)} = 0,007;$$

$$f(t) = \frac{0}{45 \times (50 - 40)} = 0; \quad f(t) = \frac{1}{45 \times (60 - 50)} = 0,002;$$

$$f(t) = \frac{1}{45 \times (70 - 60)} = 0,002.$$

Рассчитаем интенсивность отказов $\lambda(t)$ по формуле (1.9):

$$\lambda(t) = \frac{19}{\left(\frac{45 + 26}{2}\right) \times 10} = 0,0535; \quad \lambda(t) = \frac{13}{\left(\frac{26 + 13}{2}\right) \times 10} = 0,0667;$$

$$\lambda(t) = \frac{8}{\left(\frac{13 + 5}{2}\right) \times 10} = 0,0889; \quad \lambda(t) = \frac{3}{\left(\frac{5 + 2}{2}\right) \times 10} = 0,0857;$$

$$\lambda(t) = \frac{0}{\left(\frac{2 + 2}{2}\right) \times 10} = 0; \quad \lambda(t) = \frac{1}{\left(\frac{2 + 1}{2}\right) \times 10} = 0,0667;$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{\left(\frac{1 + 0}{2}\right) \times 10} = 0,2.$$

Полученные данные сведем в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Полученные результаты

Δt_i , ч	$P(t)$	$f(t) = \alpha(t)$	$\lambda(t)$, 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 (1.15).
Учитывая, что в данном случае

$$m = \frac{t_k}{\Delta t} = \frac{70}{10} = 7; \quad N_0 = 45,$$

имеем

$$T_{\text{ср}} = \frac{19 \times 5 + 13 \times 15 + 8 \times 25 + 3 \times 35 + 0 \times 45 + 1 \times 55 + 1 \times 65}{45} = 15,89.$$

Построим графики функций вероятности безотказной работы $P(t)$ (рисунок 1.1), частоты отказов $f(t)$ (рисунок 1.2), вероятности отказов $\lambda(t)$ (рисунок 1.3).

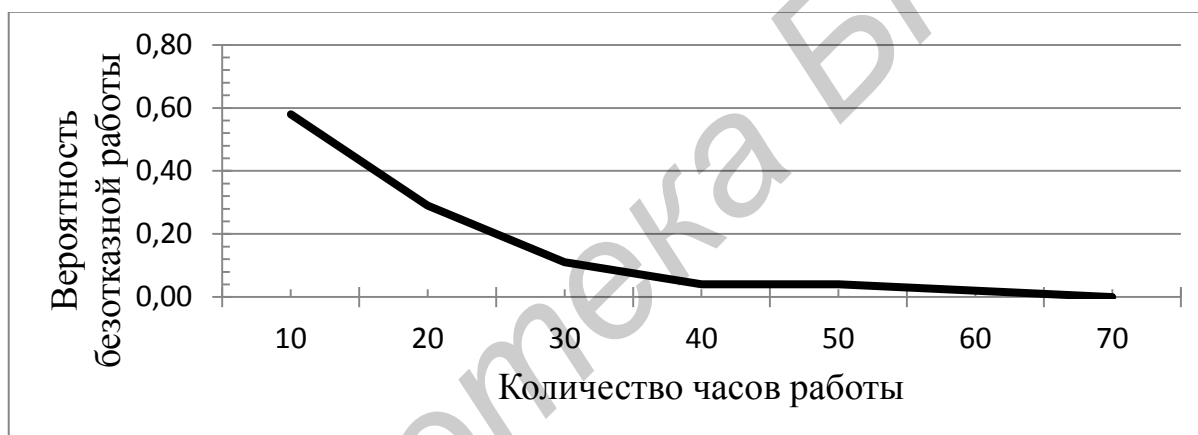


Рисунок 1.1 – Зависимость вероятности безотказной работы от времени, $P(t)$

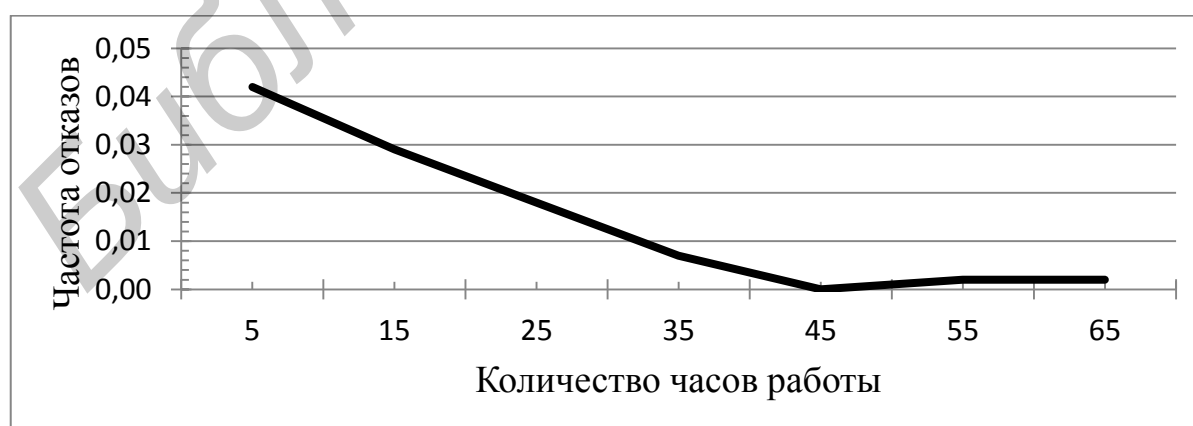


Рисунок 1.2 – Зависимость частоты отказов от времени, $f(t)$

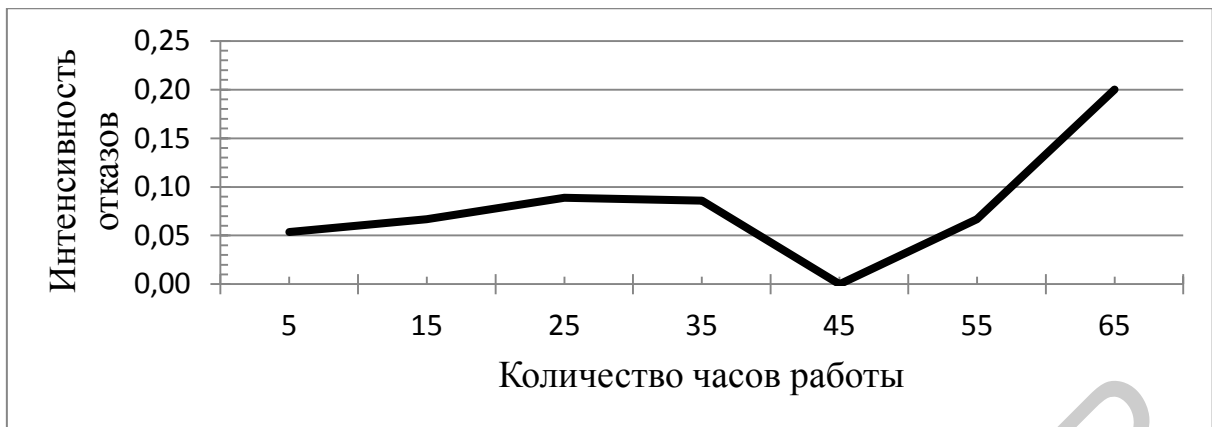


Рисунок 1.3 – Зависимость интенсивности отказов от времени, $\lambda(t)$

Вывод. Вероятность безотказной работы радиоэлектронного оборудования падала на протяжении всего процесса наблюдений и изменялась от 0,58 до 0.

Частота отказов после 5 ч работы радиоэлектронного оборудования составила $4,2 \times 10^{-2}$ ч. Далее частота отказов падала и после 45 ч работы достигла нуля. Далее до конца наблюдения частота отказов держалась на отметке 2×10^{-3} ч.

Интенсивность отказов в промежутке времени до 25 ч работы радиоэлектронного оборудования увеличивалась от $53,5 \times 10^{-3}$ до $88,9 \times 10^{-3}$ ч. Далее интенсивность отказов падала и на отметке 45 ч достигла нуля. Потом интенсивность резко увеличилась и в конце наблюдения составила 0,2 ч.

Задачи 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 1.3 приведены сведения для каждого варианта по отказам за указанный промежуток времени.

Таблица 1.3 – Исходные данные

Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3		Вариант 4		Вариант 5	
$X = 140$		$X = 150$		$X = 175$		$X = 190$		$X = 120$	
$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$	$\Delta t_i, \text{ч}$	$n(\Delta t_i)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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 1.3

Вариант 6		Вариант 7		Вариант 8		Вариант 9		Вариант 10	
$X = 220$		$X = 180$		$X = 260$		$X = 270$		$X = 100$	
Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , 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 1.3

Вариант 11		Вариант 12		Вариант 13		Вариант 14		Вариант 15	
$X = 160$		$X = 230$		$X = 240$		$X = 270$		$X = 250$	
Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$	Δt_i , ч	$n(\Delta t_i)$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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

Продолжение таблицы 1.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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

Содержание отчета

1 Титульный лист (приложение А). 2 Цель работы. 3 Исходные данные. 4 Теоретические сведения. 5 Ход выполнения работы. 6 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое надежность?
- 2 Что такое критерий надежности?
- 3 Какие критерии надежности применяют для оценки различных объектов (изделий)?
- 4 На какие группы делят критерии надежности?
- 5 Какие критерии надежности включает каждая группа?

Тема 2 Исследование безопасности технических систем с помощью дерева отказов

Цель: формирование у студентов знаний и навыков в области анализа развития аварийной ситуации с помощью логико-графического метода дерева отказов.

План занятия:

- 1 Изучить теорию вопроса.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.

Теоретические сведения

Тщательный анализ причин отказов и выработка мероприятий, наиболее эффективных для их устранения, способствует 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 2.1).

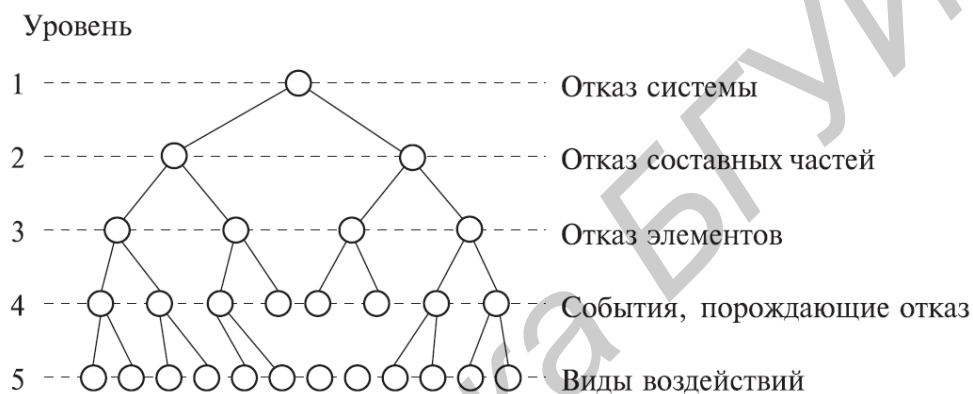


Рисунок 2.1 – Граф дерева отказов

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:

$$0 \leq P_i \leq 1, \quad (2.1)$$

где P_i – вероятность какого-то события.

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, основные, первичные, вторичные, головные и отказ.

Нормальное событие – это событие, которое может появиться или не появиться в определенное время. Это событие может рассматриваться как *отказ*, если оно произошло не вовремя.

Основное событие – это событие, которое появляется на элементном уровне. Под элементом имеется в виду наименьшая анализируемая составная часть системы.

Первичное событие – это событие, вызванное особенностями самого компонента. Например, отказ работы электролампы, связанный с перегоранием нити накала.

Вторичное событие – это событие, вызванное внешней причиной. Например, отказ работы электролампы, связанный со скачком напряжения в сети.

Головное событие – это событие при вершине дерева отказов, которое анализируется с помощью всей остальной части дерева. Обычно это результирующий отказ, выводящий систему из нормального состояния.

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).

Дерева отказов являются средством общения специалистов, поэтому они должны быть представлены в четкой, наглядной форме.

Основная структура дерева отказов может быть представлена в виде:

- отказа 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.;
- 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.

При 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) используя общие признаки, выделяют одно событие, к которому приводят все события каждой группы. Выделенное событие является головным и рассматривается с помощью отдельного дерева отказов.

При 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, 3, 4 пока либо все события не выразятся через основные события, либо анализ дальше прекращает дробиться в силу незначительности событий, отсутствия данных и т. п.;

б) используя стандартные символы событий и логические символы, представляют события в виде диаграммы;

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 отказавшее;

– 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, содержащие 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.

Чтобы отыскать и наглядно представить причинную взаимосвязь с помощью дерева отказов, необходимы элементарные блоки, подразделяющие и связывающие большое число событий. Имеется два типа блоков: логические символы (знаки) и символы событий.

Логические символы. Логические символы (знаки) связывают события в соответствии с их причинными взаимосвязями. Обозначения логических знаков приведены в таблице 2.1. Логический символ (знак) может иметь один или несколько входов, но только один выход, или выходное событие.

Логический знак «И» (схема совпадения). Выходное событие логического знака «И» наступает в том случае, если все входные события появляются одновременно.



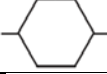
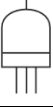


Правило формулирования событий. События, входные по отношению к операции «И», должны формулироваться так, чтобы второе было условным по отношению к первому, третье условным по отношению к первому и второму, а последнее – условным ко всем предыдущим. Кроме того, по крайней мере одно из событий должно быть связано с появлением выходного события.

Полная характеристика события не требуется. Иногда она даже мешает графической ясности диаграммы. Требуется лишь упорядочить события так, чтобы стоящее справа зависело от появления стоящего слева. Таким образом, появление выходного события будет определяться появлением последнего события в ряду N -событий.

Правило применения логического знака «И». 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?».

Таблица 2.1 – Символы логического знака

Символ логического знака	Название логического знака	Причинная взаимосвязь
	«И»	Выходное событие происходит, если все входные события случаются одновременно
	«ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается любое из входных событий
	«Запрет»	Наличие входа вызывает наличие выхода тогда, когда происходит условное событие
	«Приоритетное И»	Выходное событие случается, если все входные события происходят в нужном порядке слева направо
	«Исключающее ИЛИ»	Выходное событие происходит, если случается одно (но не оба) из входных событий
	« m из n » (голосования или выборки)	Выходное событие происходит, если случается m из n входных событий

Логический знак «ИЛИ» (схема объединения). Выходное событие логического знака «ИЛИ» наступает в том случае, если имеет место любое из входных событий.

Правило формулирования событий. 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 должно выполняться при построении дерева отказа.

Правило применения логического знака «ИЛИ». 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?».

Порядок применения логических знаков «И» и «ИЛИ». Для любого события, подлежащего дальнейшему анализу, вначале рассматриваются все возможные события, являющиеся входами операций «ИЛИ», затем входы

операций «И». Это справедливо как для головного события, так и для любого события, анализ которого целесообразно продолжить.

Примеры этих двух логических знаков показаны на рисунке 2.2. 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».

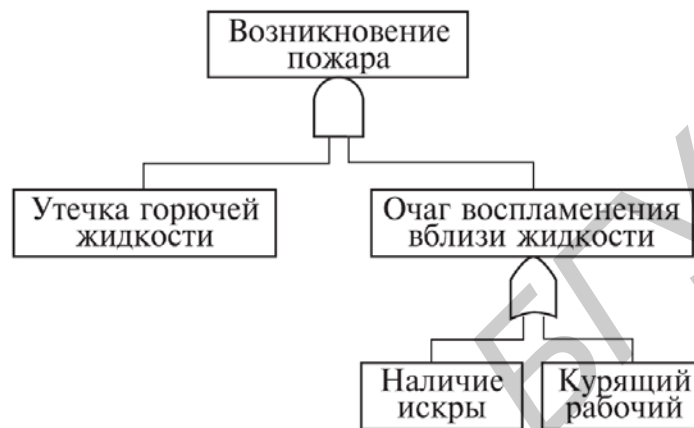


Рисунок 2.2 – Пример использования логических знаков «И» и «ИЛИ»

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

Логический знак «запрет». Шестиугольник, являющийся логическим знаком «запрет», используется для представления вероятностных причинных связей. Событие, помещенное под логическим знаком «запрет» (рисунок 2.3, а) называется входным событием, в то время как событие, расположенное сбоку от него, называется условным событием. Условное событие принимает форму события при условии появления входного события. Выходное событие происходит, если и входное, и условное событие имеют место. Другими словами, входное событие вызывает выходное событие с вероятностью (обычно постоянной) появления условного события. Логический знак «запрет» часто появляется в тех случаях, когда событие вызывается по требованию. Он используется главным образом для удобства и может быть заменен логическим знаком «И», как показано на рисунке 2.3, б.

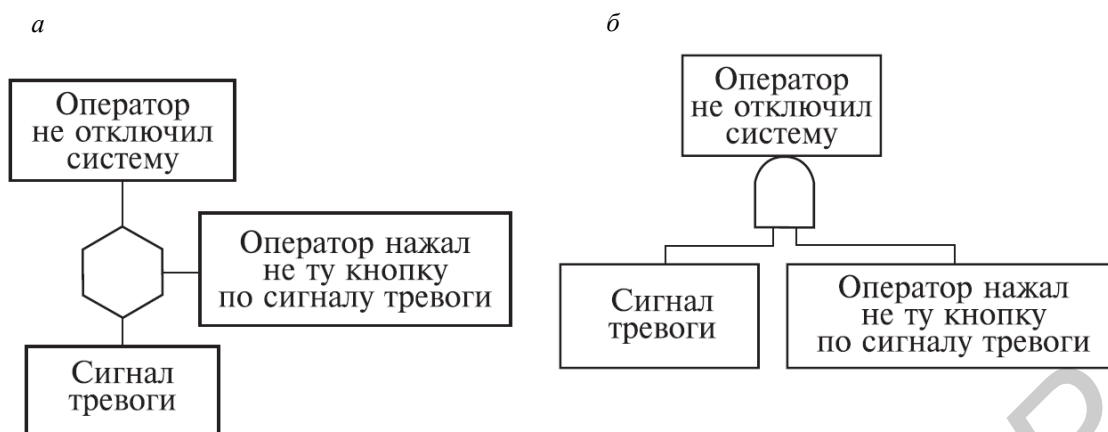


Рисунок 2.3 – Пример использования логического знака «запрет» (а) и замены его логическим знаком «И» (б)

Логический знак «приоритетное И» эквивалентен логическому знаку «И» с дополнительным требованием того, чтобы события на входе происходили в определенном порядке.

Событие на выходе появляется, если события на входе происходят в определенной последовательности (слева направо). Появление событий на входе в другом порядке не вызывает события на выходе. Рассмотрим, например, систему, имеющую основной источник питания и резервный.

Резервный источник питания включается в работу автоматически переключателем, когда отказывает основной источник. Питание в системе отсутствует, если:

- 1) отказывают как основной, так и резервный источники;
- 2) сначала выходит из строя переключатель, а затем отказывает основной источник питания.

Предполагается, что если за отказом переключателя следует отказ основного источника, то это не приведет к потере питания при условии нормальной работы резервного источника. Причинные связи в системе показаны на рисунке 2.4. Логический символ «приоритетное И» может быть представлен сочетанием «логического И» и знака «запрета», 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 2.4, показано на рисунке 2.5.

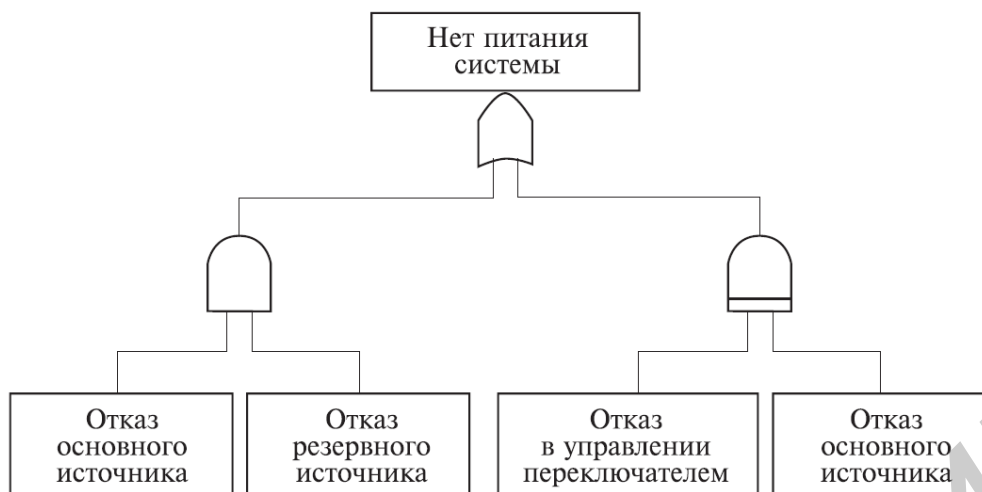


Рисунок 2.4 – Пример использования логического знака «приоритетное И»

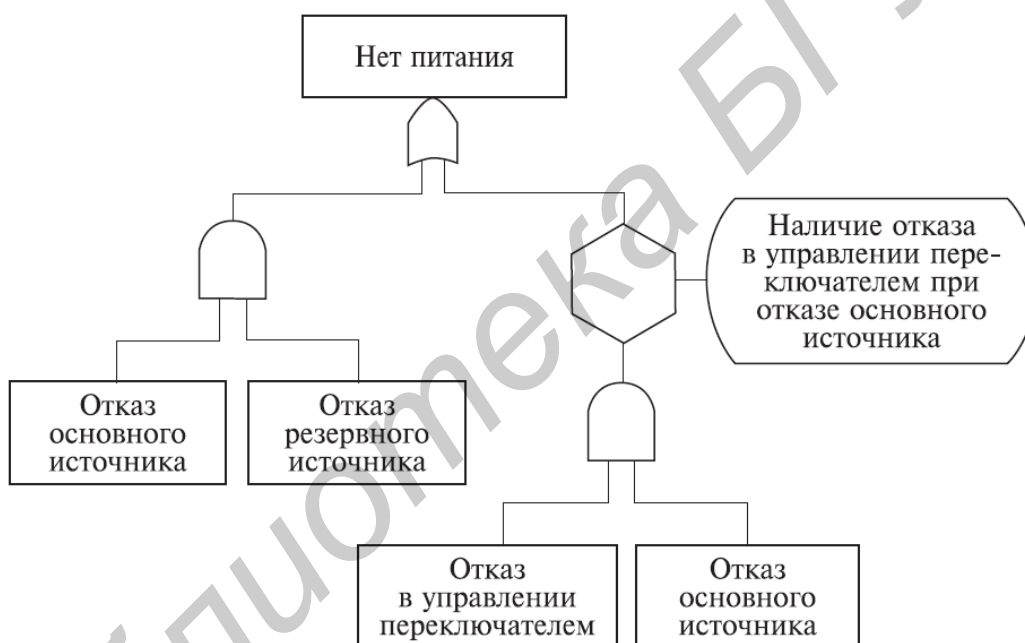


Рисунок 2.5 – Эквивалентное представление знака «приоритетное И»

Логический символ «исключающее ИЛИ» описывает ситуацию, в которой событие на выходе появляется, если одно из двух (но не оба) событий происходят на входе. В качестве примера рассмотрим систему, питаемую от двух генераторов. Частичная потеря мощности может быть представлена элементом «исключающее ИЛИ», показанным на рисунке 2.6, а. «Исключающее ИЛИ» может быть заменено комбинацией логических элементов «И» и «ИЛИ», что отражено на рисунке 2.6, б. Обычно в дереве отказов избегают использования работоспособных состояний, таких как «генератор работает», т. к. они в

значительной степени усложняют количественный анализ. Разумным подходом является замена логического знака «исключающее ИЛИ» комбинацией знаков «И» и «ИЛИ».

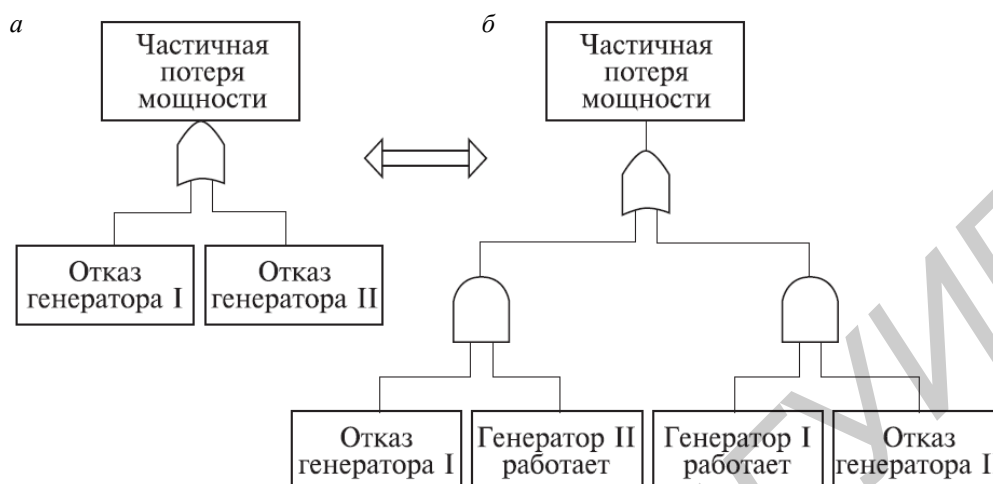


Рисунок 2.6 – Пример использования логического знака «исключающее ИЛИ» (а) и его эквивалентное представление (б)

Логический знак голосования « t из n » имеет n событий на входе, а событие на выходе появляется, если происходят по меньшей мере t из n событий на входе. Рассмотрим систему выключения, состоящую 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», как показано на рисунке 2.7. Элемент голосования (выбора) эквивалентен комбинации из логических элементов «И» и «ИЛИ» как проиллюстрировано на рисунке 2.8.

Можно ввести новые логические знаки для представления специальных типов первичных связей. Однако большинство специальных логических символов можно заменить комбинацией логических «И» и «ИЛИ».



Рисунок 2.7 – Пример применения логического знака «два из трех»

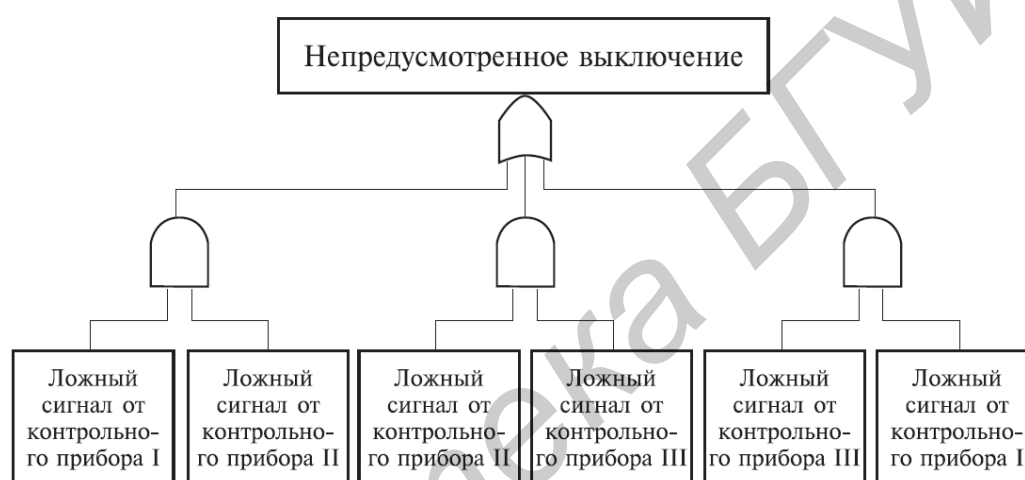


Рисунок 2.8 – Эквивалентное представление логического знака «два из трех»

Символы событий. Символы событий приведены в таблице 2.2.



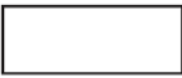



Прямоугольный блок обозначает событие отказа, которое возникает в результате более элементарных, исходных отказов, соединенных с помощью логических элементов.

Круглый блок обозначает исходный отказ (исходное событие) отдельного элемента (в пределах данной системы или окружающей среды), который определяет таким образом разрешающую способность данного дерева отказов (рисунок 2.9, а).

Для того чтобы получить количественные результаты с помощью дерева отказов, круглые блоки должны представлять события, для которых имеются данные по надежности и которые называются исходными событиями. «Отказ клапана из-за износа» может быть примером исходного отказа элемента и помещаться в круг. Обычно такое событие обуславливается определенным

элементом и, когда оно происходит, этот элемент необходимо отремонтировать или заменить.

Таблица 2.2 – Символы событий

№ п/п	Символ события	Содержание события
1		Исходный отказ (исходное событие) отдельного элемента, обеспеченное достаточными данными
2		Событие, недостаточно детально разработанное и не разложенное на элементы, анализ не доведен до исходных типов событий (отказов)
3		Событие, вводимое логическим элементом
4		Условное событие, используемое с логическим знаком «запрет»
5		Событие, которое может произойти или не произойти
6		Символы перехода «ИЗ» и «В»

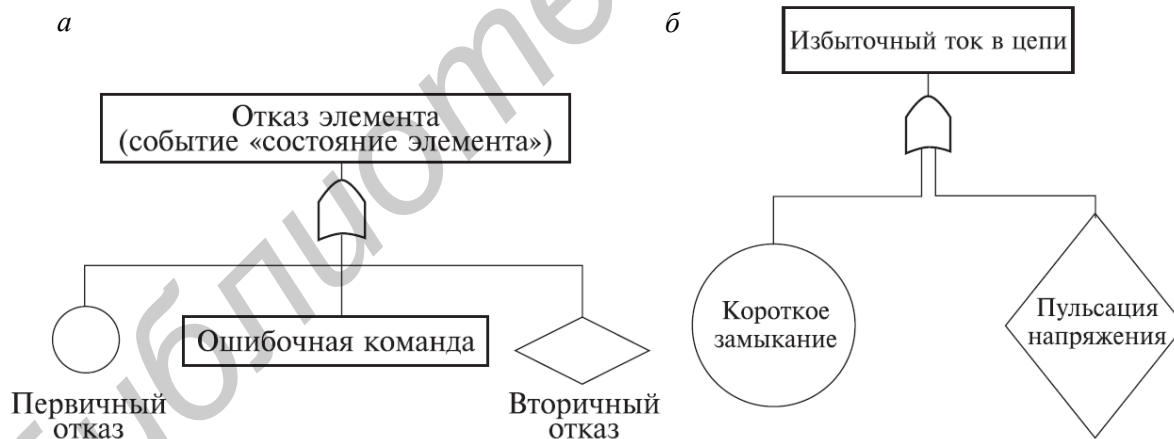


Рисунок 2.9 – Схема построения дерева отказов (а) и пример дерева отказов (б)

Ромбы используются 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. Часто такие события не увеличиваются при количественном анализе.

Они включаются на начальном этапе и их присутствие служит показателем глубины и ограничений данного исследования.

Из рисунка 2.9, б видно, что отказ «избыточный ток в цепи» может быть вызван исходным событием «короткое замыкание» или событием, не разработанным детально – «пульсация 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 не разработано до более элементарного уровня. Затем необходимо вернуться назад и проанализировать такие элементы, как генератор или другие аппараты в данной схеме.

Символ в виде домика – 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 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.

Применение символа в виде домика изображено на рисунке 2.10.

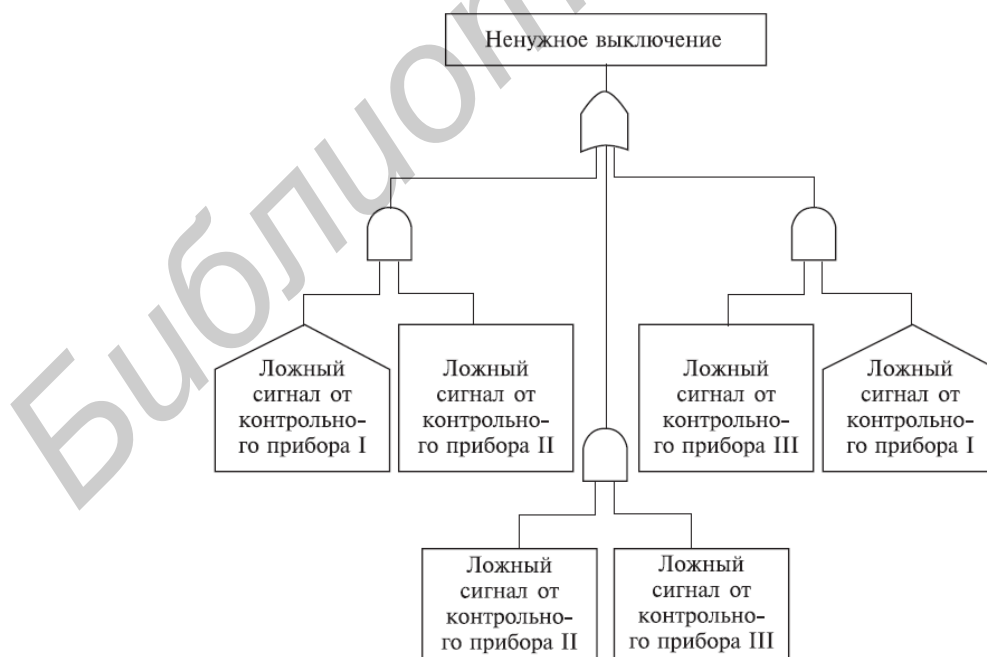


Рисунок 2.10 – Пример использования символа «домик»

Когда событие включается в рассмотрение, предполагается, что контрольный прибор I вырабатывает 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».

В строке 6 таблицы 2.2 помещена пара треугольных символов: треугольник переноса «ИЗ» и треугольник переноса «В», обозначающих два подобных типа причинных взаимосвязей. Обоим треугольникам присвоен одинаковый порядковый номер. Треугольник переноса «ИЗ» соединяется с логическим символом сбоку, а у треугольника переноса «В» линия связи проходит от вершины к другому логическому символу. Треугольники используются для того, чтобы упростить изображение дерева отказов.

Пример решения задачи

Построить дерево отказов для системы «сеть – выключатель – электрическая лампочка».

Отказ выключателя состоит лишь в том, что он не замыкается, а завершающим событием является отсутствие освещения.

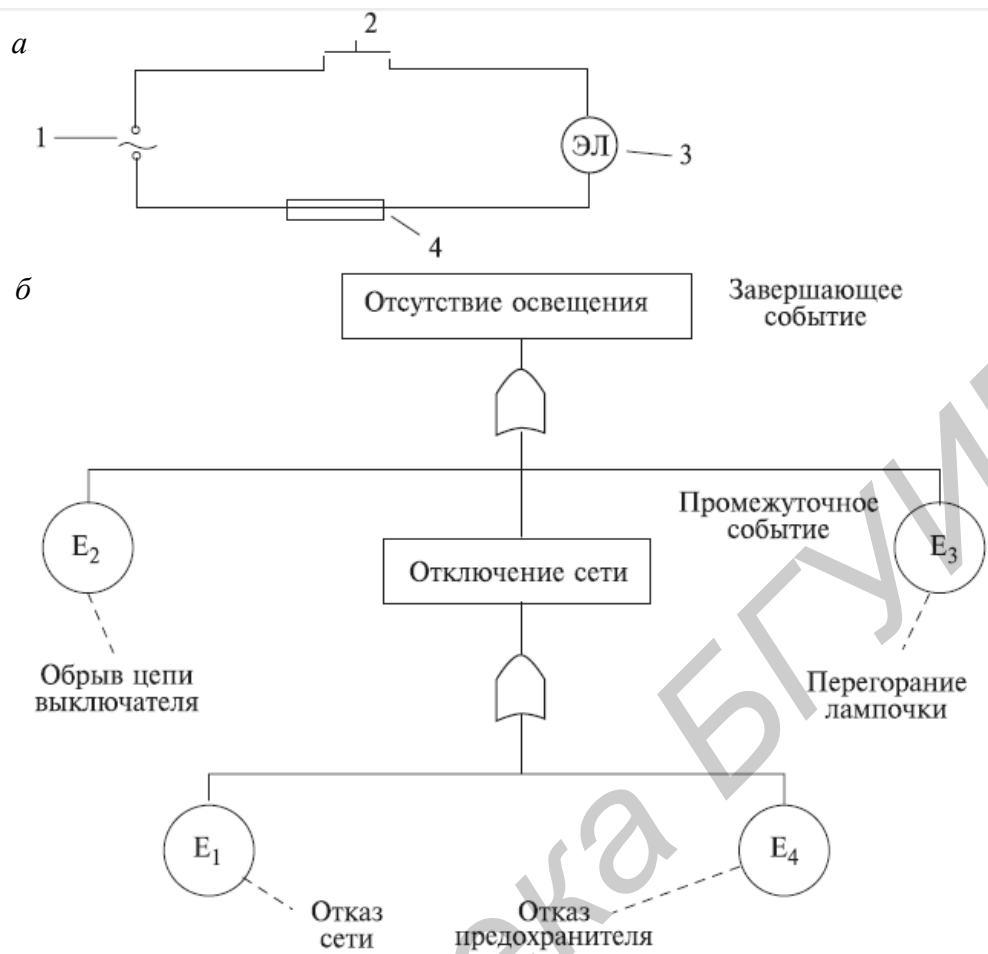
Дерево отказов для этой системы показано на рисунке 2.11. Основными (первичными) событиями дерева отказов являются: отказ источника питания $E_1(1)$, отказ предохранителя $E_4(2)$, отказ выключателя $E_2(3)$ и перегорание лампочки $E_3(4)$.

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.

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.

Задачи для самостоятельной работы

Построить дерево отказов для следующих ситуаций: 1) отказ запуска электродвигателя; 2) отказ элементов системы электроснабжения; 3) отказ элементов систем газоснабжения; 4) отказ элементов системы отопления; 5) отказ силовых трансформаторов; 6) отказ работы станка с ЧПУ; 7) другой вариант – отказ работы технологического оборудования на выбор студента.



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

Рисунок 2.11 – Электрическая схема системы «сеть – выключатель – электрическая лампочка» (а) и дерево (б) для случая первичных отказов

Содержание отчета

1 Титульный лист (см. приложение А). 2 Цель работы. 3 Исходные данные. 4 Теоретические сведения. 5 Ход выполнения работы. 6 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?

Тема 3 Анализ развития аварийной ситуации с помощью дерева событий

Цель: формирование у студентов знаний и навыков в области анализа развития аварийной ситуации с помощью логико-графического метода дерева событий.

План занятия:

- 1 Изучить теорию вопроса.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.

Теоретические сведения

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 разветвляются 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.

Процедура построения дерева событий сводится к ряду последовательных действий:

1 Анализ начинается с четкого определения конечного события.

2 «Состояние системы», или конечное событие, детализируется с точным определением причин и использованием логических знаков до событий, которые классифицируются как «состояние элемента».

3 События «состояние элемента» разрабатываются по схеме (рисунок 3.1).

4 Если первичные и вторичные события не разрабатываются более детально, их превращают в элементарные события при построении дерева событий.

5 «Ошибочные команды» являются обычно событиями типа «состояние системы», которые следует разрабатывать детальнее, пока не будут найдены соответствующие им события типа «состояние элемента».

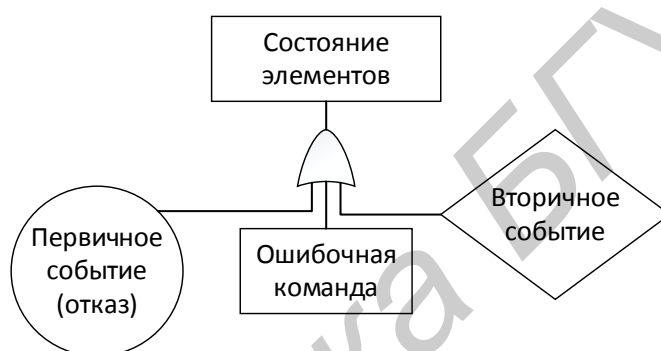


Рисунок 3.1 – Схема построения дерева событий

6 Последние, в свою очередь, детализируются по схеме п. 3.

7 Разработку завершают, когда нет возможности отыскать новые «ошибочные команды».

Символы, используемые для построения дерева событий приведены в таблице 2.2.

Логические символы связывают события в соответствии с причинными взаимосвязями. Основные логические символы приведены в таблице 2.1. В нижней части логического знака располагаются входные события, в верхней – выходное событие. Входных событий может быть два или более, выходное – одно.

Для представления вероятностных причинных связей используется логический знак «Запрет». Наличие входа вызывает появление выхода тогда, когда происходит условное событие. Иными словами, входное событие вызывает выходное событие с вероятностью появления условного события. Например, события «утечка горячей жидкости» и «пожар» связаны не детерминированной, а вероятностной связью, т. к. не всякая утечка горячей

жидкости приводит к пожару. Для возникновения пожара необходимо условное событие – наличие источника воспламенения.

Примеры использования логических знаков «И» и «ИЛИ» приведены на рисунке 3.2.

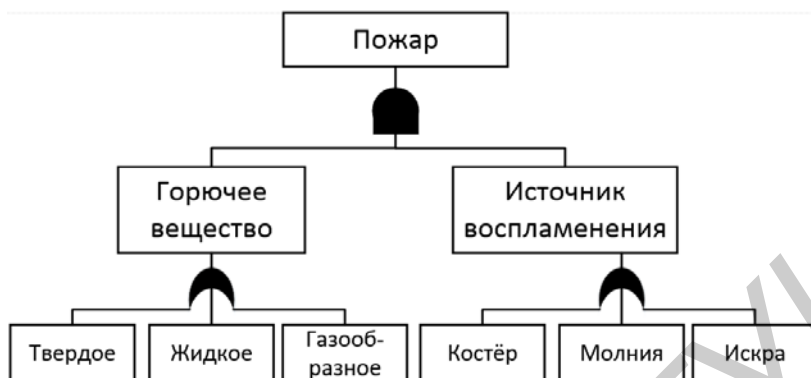


Рисунок 3.2 – Пример использования логических знаков «И» или «ИЛИ»

При этом используется прямая (индуктивная) логика. Для отыскания возможных причин появления опасного состояния системы используется анализ с обратным порядком. Например, при решении вопроса: что случится, если откажет насос? От этого состояния в обратном направлении отыскиваются возможные причины появления этого состояния.

Каким образом может отказать система? Характерным примером использования прямого подхода является построение дерева событий, обратного – дерева отказов. При выполнении анализа в прямом порядке принимается набор последовательностей событий и составляются соответствующие им сценарии, оканчивающиеся опасными состояниями. Для составления сценария необходимы данные по взаимосвязи элементов и топографии системы, а также данные по отказам элементов.

Пример решения задачи

Предположим, путем выполнения предварительного анализа опасностей было 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 иницирующим событием, вероятность которого равна P_A (рисунок 3.3), 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 3.3 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 3.3. 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 для охлаждения активной зоны реактора распылителей, не могут производиться. В результате упрощенное дерево событий не содержит выбора в случае отсутствия электрического питания и может произойти большая утечка, вероятность которой равна $P_A \times P_B$. 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 АСОР. Она может работать или не работать, и ее отказ с вероятностью P_{C_1} ведет к последовательности событий, изображенной на рисунке 3.3. 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 с меньшей вероятностью, чем в случае работоспособности. Рассмотрев все варианты дерева, можно получить спектр возможных утечек и соответствующие вероятности для различных последовательностей развития аварии (рисунок 3.4). Верхняя линия дерева является основным вариантом аварии реактора. При данной последовательности предполагается, что трубопровод разрушается, а все системы обеспечения безопасности сохраняют работоспособность.

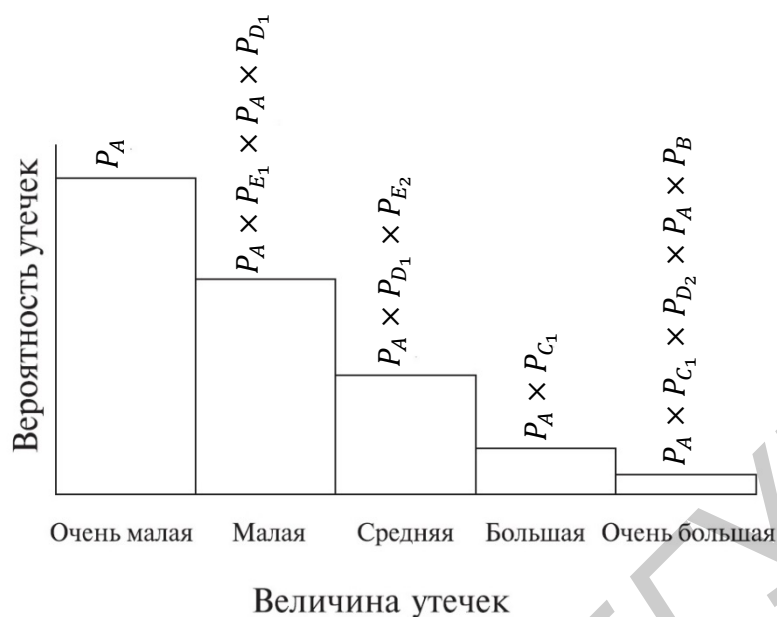


Рисунок 3.4 – Гистограмма вероятностей для различных величин утечек

Задачи для самостоятельной работы

Построить дерево событий для следующих ситуаций: 1) разрыв нефтепровода; 2) взрыв бочки с горючей жидкостью; 3) пролив горючего на производстве; 4) авария на атомной электростанции; 5) другие ситуации.

Содержание отчета

1 Титульный лист (см. приложение А). 2 Цель работы. 3 Исходные данные. 4 Теоретические сведения. 5 Ход выполнения работы. 6 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое дерево событий?
- 2 С чего начинается построение дерева событий?
- 3 Какие символы логического знака используют при построении дерева событий? Каково их назначение?
- 4 Какое событие называют «состояние системы»?
- 5 Какое событие называют «состояние элемента»?
- 6 Какое событие называют «ошибочная команда»?

Тема 4 Взрывопожаробезопасность на производстве

Цель: приобретение практических навыков проведения технических расчетов для оценки взрывопожарной и пожарной опасности промышленных предприятий.

План занятия:

- 1 Изучить теорию вопроса.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.

Теоретические сведения

ТКП 474–2013 «Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» устанавливает методику определения категорий помещений и зданий (ТКП не распространяется на помещения, здания и наружные установки для производства и хранения взрывчатых веществ). Категории взрывопожарной и пожарной опасности помещений и зданий принимают в соответствии с таблицей 4.1.

Таблица 4.1 – Категории помещений

Категория помещения	Характеристика веществ и материалов, находящихся (обращающихся) в помещении
1	2
А (взрывопожаро-опасная)	Горючие газы (ГГ), легковоспламеняющиеся жидкости (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 (взрывопожаро-опасная)	Горючие пыли или волокна, ЛВЖ с температурой вспышки более 28 °С, горючие жидкости (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)	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

Продолжение таблицы 4.1

1	2
Г2	Негорючие вещества и материалы в горячем, раскаленном или расплавленном состоянии, процесс обработки которых сопровождается выделением лучистого тепла, искр и пламени
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)

1 Разделение помещений на категории В1–В4 осуществляется согласно таблице 4.2.

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).

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 4.2).

Таблица 4.2 – Пожароопасные категории помещений

Категория помещения	Удельная пожарная нагрузка g на участке, МДж/м ²	Способ размещения
1	2	3
В1	Более 2200	Не нормируется
В2	1400–2200	При количестве пожарной нагрузки Q , определенной по формуле (4.1), выполняется неравенство $Q \geq 0,64 \times g \times H^2$, где g в неравенстве принимается равным 2200 МДж/м ² , если расчетная удельная пожарная нагрузка g (формула (4.2)) получается равной $1400 \text{ МДж/м}^2 < g \leq 2200 \text{ МДж/м}^2$, а H – минимальное расстояние от поверхности пожарной нагрузки до нижнего пояса ферм перекрытия (покрытия), м

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3
В3	200–1400	При количестве пожарной нагрузки Q , определенной по формуле (4.1), выполняется неравенство $Q \geq 0,64 \times g \times H^2$, где g в неравенстве принимается равным 1400 МДж/м^2 , если расчетная удельная пожарная нагрузка g (формула (4.2)) получается равной $200 \text{ МДж/м}^2 < g \leq 1400 \text{ МДж/м}^2$
В4	100–200	На любом участке пола помещения площадью не более 10 м^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

$$Q = \sum_{i=1}^n G_i \times Q_{HI}^P, \text{ МДж}, \quad (4.1)$$

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

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

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

$$g = \frac{Q}{S}, \text{ МДж/м}^2, \quad (4.2)$$

где S – площадь размещения пожарной нагрузки (м²) определяется как ее линейная проекция на пол в пределах пожарного участка (не менее 10 м^2 и не более площади всего помещения).

Определение категории помещений и зданий по взрывопожарной и 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 газоздушные 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 объемом помещения и объемом, занимаемым технологическим оборудованием, с погрешностью не более 7 %. 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: свойства веществ должны соответствовать требованиям согласно таблице 4.1; 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 C, H, O, N, Cl, Br, I, F, определяется по формуле

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \times \frac{m \times Z}{V_{\text{св}} \times \rho_{\text{Г,П}}} \times \frac{100}{C_{\text{ст}}} \times \frac{1}{k_{\text{н}}}, \text{ кПа}, \quad (4.3)$$

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 (таблица 4.4);

$V_{\text{св}}$ – 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 $t_{\text{р}}$, которая вычисляется по формуле

$$\rho_{\text{г,п}} = \frac{M}{V_0 \times (1 + 0,00367 \times t_{\text{р}})}, \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}, \quad (4.4)$$

где M – молярная масса, кг · кмоль⁻¹ (таблица 4.5);

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

$t_{\text{р}}$ – расчетная температура, °С.

За расчетную температуру принимается абсолютная температура воздуха в данном районе (г. Минск) согласно СНБ 2.04.02–2002 «Строительная климатология» $t_{\text{р}} = 35$ °С.

Стехиометрическая концентрация ГГ или паров ЛВЖ и ГЖ вычисляется по формуле

$$C_{\text{ст}} = \frac{100}{1 + 4,84 \times \beta}, \% (\text{об.}), \quad (4.5)$$

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

$$\beta = n_{\text{с}} + \frac{n_{\text{н}} - n_{\text{х}}}{4} - \frac{n_{\text{о}}}{2}, \quad (4.6)$$

где $n_{\text{с}}$, $n_{\text{н}}$, $n_{\text{х}}$, $n_{\text{о}}$ – число атомов С, Н, О и галоидов (N, Cl, Br, I, F) в молекуле горючего вещества (см. таблицу 4.5);

Расчет ΔP для других веществ смотрите пп. 5.5–5.8. 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

$$m = m_p + m_{\text{емк}} + m_{\text{св.окр}}, \text{ кг}, \quad (4.7)$$

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 формуле (4.7) определяется по формуле

$$m = W \times F_{\text{и}} \times T, \text{ кг} \quad (4.8)$$

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

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

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

Интенсивность испарения W определяется по формуле

$$W = 10^{-6} \times \eta \times \sqrt{M} \times P_{\text{н}}, \text{ кгс}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}, \quad (4.9)$$

где η – коэффициент, принимаемый по таблице 4.6;

M – молярная масса горючего, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$ (см. таблицу 4.5);

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

$$P_{\text{н}} = 10^{A - \frac{B}{C_A + t_{\text{ж}}}}, \text{ кПа}, \quad (4.10)$$

где A, B, C_A – константы уравнения Антуана (см. таблицу 4.5);

$t_{\text{ж}}$ – температура жидкости, $^{\circ}\text{C}$.

Пример решения задачи

Задача. Определить категорию взрывопожарной и пожарной опасности помещения. На участок вакуумного напыления, расположенный в отдельном помещении ($8 \times 16 \times 3$ м), доставляется на тележке сменный запас ЛВЖ в составе: 8 л изопропилового спирта во фляге, 2 л этилового спирта в литровых стеклянных бутылках. Воздухообмен, создаваемый системами вентиляции, не учитывается. Район – г. Минск.

Решение. Возможны два варианта аварийной ситуации:

- 1) разлив при разгрузке 2 л этилового спирта;
- 2) разлив 8 л изопропилового спирта при расфасовке в стеклянные бутылки.

Для анализа выбираем наиболее неблагоприятный вариант – разлив 8 л спирта. Суть ситуации состоит в том, что разлившийся 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 (4.4):

$$\rho_{г,п} = \frac{M}{V_0 \times (1 + 0,00367 \times t_p)} = \frac{60,09}{22,413 \times (1 + 0,00367 \times 35)} = 2,38 \text{ кгм}^{-3};$$

давление насыщенного пара – по формуле (4.10)

$$P_H = 10^{A - \frac{B}{C_A + t_{ж}}} = 10^{7,51055 - \frac{1733,00}{232,380 + 35}} = 10,69 \text{ кПа};$$

интенсивность испарения – по формуле (4.9):

$$\begin{aligned} W &= 10^{-6} \times \eta \times \sqrt{M} \times P_H = 10^{-6} \times 1,6 \times \sqrt{60,09} \times 10,69 = \\ &= 1,33 \times 10^{-4}, \text{ кгс}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}; \end{aligned}$$

масса паров разлившейся жидкости – по формуле (4.8):

$$m_p = W \times F_{и} \times T = 0,148 \times 10^{-3} \times 8 \times 3600 = 3,82 \text{ кг};$$

масса паров изопропилового спирта, поступивших в помещение, – по формуле (4.7):

$$m = m_p + m_{емк} + m_{св.окр} = 3,82 + 0 + 0 = 3,82 \text{ кг};$$

стехиометрический коэффициент $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ в реакции сгорания – по формуле (4.6):

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

стехиометрическая концентрация паров C_3H_8O – по формуле (4.5):

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

избыточное давление взрыва ΔP – по формуле (4.3):

$$\Delta P = (900 - 101) \times \frac{3,82 \times 0,3}{307,2 \times 2,38} \times \frac{100}{4,39} \times \frac{1}{3} = 9,51 \text{ кПа.}$$

Полученное расчетное значение избыточного давления паровоздушной смеси превышает 5 кПа, температура вспышки изопропилового спирта составляет плюс 14 °С, значит (согласно таблице 4.1) производственное помещение относим к категории А (взрывопожароопасной).

Задачи для самостоятельной работы

Определить категорию взрывопожарной и пожарной опасности помещения участка отмывки оснований по вариантам заданий, приведенных в таблице 4.3. Геометрический объем помещения – $V_{п}$. В нем установлена емкость, объемом $V_{емк}$, в которой находится технологическая жидкость. Воздухообмен, создаваемый системами вентиляции, – v . Район – г. Минск. 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.

Таблица 4.3 – Варианты заданий

Параметр	Варианты														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Объем помещения $V_{п}, \text{м}^3$	8×9×3	7×9×2,5	5×7×3	6×8×3	5×8×3	7×12×3	6×8×3	5×8×3	5×10×3	6×12×3	8×12×3	7×10×3	7×10×3	6×12×3	9×12×3
Объем емкости $V_{емк}, \text{м}^3$	50	30	40	30	10	50	50	30	10	40	50	20	20	50	50

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Скорость воздухообмена, v , м/с	0,3	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,2	0,1	0,1
Вид технологической жидкости	Амилацетат	Хлорбензол	Анилин	Ацетон	Амилен	н-Бутиловый спирт	Стирол	Толуол	н-Гексан	Циклогексан	Этилацетан	Диэтиловый эфир	н-Пентан	Изопропилбензол	Метиловый спирт

Таблица 4.4 – 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 4.5 – Показатели взрывопожароопасности веществ и материалов

Вещество	Химическая формула	Молярная масса, кг·кмоль ⁻¹	Температура вспышки, °С	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
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
н-Бутиловый спирт	$C_4H_{10}O$	74,122	+35	8,72232	2664,684	279,683	ЛВЖ
н-Гексан	C_5H_{14}	86,177	-23	5,99517	1166,274	223,661	ЛВЖ
Диэтиловый спирт	$C_4H_{10}O$	74,12	-41	6,12270	1098,945	232,372	ЛВЖ
Изопропилбензол	C_9H_{12}	120,20	+37	6,06756	1461,643	207,56	ЛВЖ
Метиловый спирт	CH_4O	32,04	+6	7,3527	1660,454	245,818	ЛВЖ
н-Пентан	C_5H_{12}	72,150	-44	5,97208	1062,555	231,805	ЛВЖ
Стирол	C_8H_8	104,14	+30	7,06542	2123,057	272,986	ЛВЖ
Толуол	C_7H_8	92,140	+7	6,0507	1328,171	217,713	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
Этилацетан	$C_4H_8O_2$	88,10	-3	6,22672	1244,951	217,881	ЛВЖ

Таблица 4.6 – 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

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.

Содержание отчета

1 Титульный лист (см. приложение А). 2 Цель работы. 3 Исходные данные. 4 Теоретические сведения. 5 Ход выполнения работы. 6 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 такое свободный объем помещения?

Тема 5 Определение безопасных условий использования баллонов с горючим газом

Цель: приобретение практических навыков проведения технических расчетов для оценки безопасных условий использования баллонов с горючим газом на производстве.

План занятия:

- 1 Изучить теорию вопроса.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.

Теоретические сведения

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 сосуде или внешней среде;
- эрозия материала сосудов, т. е. разрушение материалов стенок вследствие механического воздействия находящихся в сосуде веществ и материалов или вследствие электрических разрядов.

При таких взрывах возникающее внутреннее давление в сосуде превышает предельно допустимое значение. Это приводит к разгерметизации сосуда с последующим взрывом. В случае если хранящееся в сосуде 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 сосуде вызывает вскипание находящейся в нем жидкости и образование воздушной ударной волны. Ударная волна вызывает разрушения оборудования, выброс газа- 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 явления BLEVE необходимы следующие условия:

- жидкость, хранящаяся в герметичном сосуде под давлением, к моменту вскипания (за счет сброса давления) должна быть термодинамически 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.

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:

$$X_{\text{НКПРП}} = Y_{\text{НКПРП}} = 14,6 \left(\frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} c_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,33}, \quad (5.1)$$

$$Z_{\text{НКПРП}} = 0,33 \left(\frac{m_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma} c_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,33}; \quad (5.2)$$

для паров ЛВЖ:

$$X_{\text{НКПРП}} = Y_{\text{НКПРП}} = 3,2\sqrt{K} \left(\frac{p_{\text{н}}}{C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} p_{\text{н}}} \right)^{0,33}, \quad (5.3)$$

$$Z_{\text{НКПРП}} = 0,12\sqrt{K} \left(\frac{p_{\text{н}}}{C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} p_{\text{н}}} \right)^{0,33}, \quad (5.4)$$

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;

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

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

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

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

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

Радиус R_3 (м) и высоту Z_3 (м) зоны, ограниченной НКПРП газов и паров, вычисляют исходя из значений $X_{\text{НКПРП}}$, $Y_{\text{НКПРП}}$ и $Z_{\text{НКПРП}}$.

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

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 $h_{\text{ист}} = Z_{\text{НКПРП}}$ 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 НКПР газы 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.

Примеры решения задач

Задача 1. Определить размеры зоны, ограниченной НКПРП газов, при аварийной разгерметизации емкости с метаном на открытом пространстве. При разгерметизации емкости в атмосферу поступит 20 кг метана. Емкость представляет собой цилиндр с основанием радиусом 1 м и высотой $h_{\text{ист}} = 10$ м. Максимально возможная температура для климатической зоны $t_p = 30$ °С. Плотность метана ρ_m при t_p равна $0,645$ кг/м³. Нижний концентрационный предел распространения пламени метана $C_{\text{НКПРП}} = 5,28$ % (об.).

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

$$X_{\text{НКПРП}} = Y_{\text{НКПРП}} = 14,6 \left(\frac{m_m}{\rho_m C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,33} = 14,6 \left(\frac{20}{0,645 \times 5,28} \right)^{0,33} = 26,18 \text{ м,}$$

$$Z_{\text{НКПРП}} = 0,33 \left(\frac{m_m}{\rho_m C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,33} = 0,33 \left(\frac{20}{0,645 \times 5,28} \right)^{0,33} = 0,59 \text{ м.}$$

Таким образом, для расчетной аварии емкости с метаном геометрически зона, ограниченная НКПРП газов, будет представлять цилиндр с основанием радиусом $R_G = 26,18$ м и высотой $h_z = h_{\text{ист}} + R_z = 10 + 26,18 = 36,18$ м. В пределах этой зоны создается взрывоопасная среда. За начало зоны, ограниченной НКПРП газов, принимают внешние габаритные размеры емкости.

Задача 2. Определить размеры зоны, ограниченной НКПРП паров, при аварийной разгерметизации трубопровода, транспортирующего ацетон. Трубопровод, транспортирующий ацетон, проложен на открытом пространстве на высоте $h_{\text{ист}} = 0,5$ м от поверхности земли. Трубопровод оснащен ручными задвижками. Масса паров ацетона, поступивших в открытое пространство за время полного испарения, составляет $m_a = 240$ кг при времени испарения $T = 3600$ с. Максимально возможная температура для климатической зоны $t_p = 36$ °С. Плотность паров ацетона ρ_a при t_p равна $2,29$ кг/м³. Нижний концентрационный предел распространения пламени паров ацетона $C_{\text{НКПРП}} = 2,7$ % (об.). Давление насыщенных паров ацетона p_n при t_p равно $48,09$ кПа.

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

$$X_{\text{НКПРП}} = Y_{\text{НКПРП}} = 3,2\sqrt{K} \left(\frac{p_{\text{H}}}{C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}} p_{\text{H}}} \right)^{0,33} =$$

$$= 3,2 \sqrt{\frac{3600}{3600}} \left(\frac{48,09}{2,7} \right)^{0,8} \left(\frac{240}{2,29 \times 48,09} \right)^{0,33} = 41,43 \text{ м,}$$

$$Z_{\text{НКПРП}} = 0,12\sqrt{K} \left(\frac{p_{\text{H}}}{C_{\text{НКПРП}}} \right)^{0,8} \left(\frac{m_{\text{a}}}{\rho_{\text{a}} p_{\text{H}}} \right)^{0,33} =$$

$$= 0,12 \sqrt{\frac{3600}{3600}} \left(\frac{48,09}{2,7} \right)^{0,8} \left(\frac{240}{2,29 \times 48,09} \right)^{0,33} = 1,55 \text{ м.}$$

Таким образом, граница зоны, ограниченной НКПРП паров, по горизонтали будет проходить на расстоянии 41,43 м от обечайки (обечайка – открытый с торцов цилиндрический или конический барабан без днищ) трубопровода, а по вертикали – на высоте $h_3 = Z_{\text{НКПРП}} = 1,55$ м от поверхности земли. В пределах этой зоны создается взрывоопасная среда.

Задачи для самостоятельной работы

Задача 1. Определить размеры зоны, ограниченной НКПРП газов, при аварийной разгерметизации емкости с ГГ на открытом пространстве. При разгерметизации емкости в атмосферу поступит $m_{\text{ГГ}}$ метана. Емкость представляет собой цилиндр с основанием радиусом 1 м и высотой $h_{\text{ист}}$. Максимально возможная температура для климатической зоны (г. Минск) $t_{\text{p}} = 35$ °С. Исходные данные приведены в таблице 5.1.

Задача 2. Определить размеры зоны, ограниченной НКПРП паров, при аварийной разгерметизации трубопровода, транспортирующего ЛВЖ. Трубопровод, транспортирующий ЛВЖ, проложен на открытом пространстве на высоте $h_{\text{ист}} = 0,5$ м от поверхности земли. Трубопровод оснащен ручными задвижками. Масса паров ЛВЖ, поступивших в открытое пространство за время полного испарения, составляет $m_{\text{ЛВЖ}}$ при времени испарения $T = 3600$ с. Максимально возможная температура для климатической зоны (г. Минск) $t_{\text{p}} = 35$ °С. Исходные данные приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.1 – Характеристики горючих веществ

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Наименование горючего газа	Аммиак	Ацетилен	н-Бутан	Винил-хлорид	Водород	Изобутан	Метан	Оксид углерода	Пропан	Пропилен	Сероводород	Этилен	Хлорэтан	Этан	Изобутилен
$m_{ГГ}$, кг	20	30	40	20	30	40	20	30	40	20	30	40	20	30	40
$h_{ист}$, м	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10	15	10
$\rho_{ГГ}$, кг/м ³	0,7714	1,1709	2,703	0,9106	0,08987	0,601	0,7168	1,25	2	1,92	1,52	0,001	0,919	1,356	0,5879
$C_{НКПРП}$, % (об.)	15	2,5	1,8	3,6	4,12	1,81	5,28	12,5	2,3	2,4	4,3	2,7	3,8	2,9	1,78

Таблица 5.2 – Характеристики легковоспламеняющихся жидкостей

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Наименование ЛВЖ	Октан	Бензол	Гексан	Изопропиловый спирт	Диэтиловый эфир	Бутиловый спирт	Метиловый спирт	Пентан	Сероуглерод	м-Ксилол	Толуол	Уксусная кислота	Хлорбензол	Этиловый спирт	Этилацетат
$m_{ЛВЖ}$, кг	280	240	260	270	250	280	240	260	270	250	280	240	260	270	250
$h_{ист}$, м	0,5	0,8	0,6	0,7	0,5	0,8	0,6	0,7	0,5	0,8	0,6	0,7	0,5	0,8	0,6
$\rho_{ЛВЖ}$, кг/м ³	703	879	654,8	785,1	714	809,9	791,5	626,2	1260	880,2	866,9	1049,2	1106,6	780,9	902
$C_{НКПРП}$, % (об.)	0,8	1,43	1,242	2,23	1,7	1,81	6,98	1,4	0,6	1,1	1,27	3,33	1,4	3,61	2,08
p_n , кПа	24,6	149,5	232	82,55	777,5	14,05	210,5	738	526,5	14,9	51,75	27,7	20,75	106,9	152,5

Содержание отчета

1 Титульный лист (см. приложение А). 2 Цель работы. 3 Исходные данные. 4 Теоретические сведения. 5 Ход выполнения работы. 6 Выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какое явление называют BLEVE? В чем его сущность?
- 2 Какие причины вызывают явление BLEVE?
- 3 Какое явление называют «огненный шар»?
- 4 Что называют нижним (верхним) концентрационным пределом распространения пламени?

Тема 6 Оценка обстановки при авариях на химически опасных объектах

Цель: формирование у студентов знаний и навыков оценки обстановки при авариях на химически опасных объектах.

План занятия:

- 1 Изучить теорию вопроса.
- 2 Выполнить практическое задание.
- 3 Ответить на контрольные вопросы.

Теоретические сведения

Химическая авария – авария на химически опасном объекте, сопровождающаяся проливом, выбросом (сбросом) 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 среды.

Химически опасный объект (ХОО) – объект, на котором хранят, перерабатывают, используют или транспортируют опасные химические вещества в концентрациях или количествах, создающих опасность для жизни и здоровья людей, сельскохозяйственных животных и растений в течение определенного времени.

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.

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; токсодоза.

Концентрация ОХВ в среде – содержание ОХВ в единице объема или массы среды ($\text{мг}/\text{м}^3$, $\text{мг}/\text{кг}$).

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 химического заражения – территория или акватория, в пределах которой распространены или привнесены ОХВ в концентрациях и количествах, создающих опасность для жизни и здоровья людей, сельскохозяйственных животных и растений в течение определенного времени.

Масштабы заражения АХОВ, в зависимости от физических свойств и агрегатного состояния, рассчитываются по первичному и вторичному облаку.

Первичное облако – облако зараженного воздуха, образующееся в результате мгновенного перехода в атмосферу всего объема или части содержимого емкости с опасным химическим веществом при ее разрушении.

Вторичное облако – облако зараженного воздуха, образующееся в результате испарения разлившейся ядовитой жидкости с подстилающей поверхности.

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 получают 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 (от 1 до 300 мкм) и, 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: территорию, подвергающуюся непосредственному воздействию АХОВ, и территорию, 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, изотермию и конвекцию.

Инверсия – состояние приземного слоя воздуха, при котором температура нижнего слоя меньше температуры верхнего слоя (устойчивое состояние атмосферы).

Изотермия – состояние приземного слоя воздуха, при котором температура нижнего и верхнего слоев одинаковы (безразличное состояние атмосферы).

Конвекция – 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, вокзалы, торговые помещения и пр. Относительно

длительное время концентрация АХОВ внутри помещений и вне их будет почти одинаковой. Концентрация АХОВ внутри здания снижается медленно.

Отдельные АХОВ ввиду высокой проникающей способности и сорбции могут заразить все объекты окружающей среды, которые станут источниками контактного заражения.

Некоторые АХОВ способны на длительное время (неделю, месяц) заражать биосферу, вследствие чего нарушается экологическое равновесие.

В случае военных действий, ЧС природного и техногенного характера, когда разрушается полностью или частично ХОО, может произойти выброс (разлив) нескольких различных АХОВ. В этом случае 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 т. д.), 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 они могут оказывать комбинированное воздействие на организм, что приводит 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, т. к. дислокация химически опасного объекта, типы и масса имеющихся АХОВ известны. Исключение составляют зоны химического заражения, образованные в результате химических аварий на железнодорожных станциях, автодорожных магистралях и других объектах.

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 – одно из необходимых условий обеспечения безопасности населения.

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

- за величину выброса АХОВ его количество в одной максимальной емкости (технологической, складской, транспортной);
- метеоусловия: инверсия, скорость приземного ветра 1–2 м/с, температура окружающего воздуха – 20 °С.

При прогнозе масштабов заражения по факту аварии используются реальные и сходные данные.

Внешняя граница зоны заражения рассчитывается по пороговой токсодозе.

При прогнозировании применяются следующие допущения:

- емкость, содержащая АХОВ, разрушается полностью, и все ее содержимое поступает в окружающую среду;
- при авариях на газо- и продуктопроводах величина выброса АХОВ принимается равной количеству, содержащемуся в трубопроводе между автоматическими отсекающими (275–500 т);
- толщина слоя свободно разлившейся по подстилающей поверхности ядовитой жидкости принимается равной 0,05 м по всей площади разлива;

– при проливе сжиженного АХОВ в поддон или обваловку толщина слоя жидкости (h , м) принимается равной

$$h = H - 0,2, \quad (6.1)$$

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

– для емкостей, расположенных группой с одним поддоном (в одной обваловке), толщина слоя жидкости (h , м) принимается равной

$$h = \frac{Q}{F \times d}, \quad (6.2)$$

где Q – количество разлившегося АХОВ, т;

F – площадь разлива, м²;

d – плотность сжиженного 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.

Прогнозирование и оценка обстановки при выбросах АХОВ в окружающую среду

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

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

$$T_{\text{исп}} = \frac{h \times d}{K_2 \times K_4 \times K_7}, \quad (6.3)$$

где h – толщина слоя разлившегося АХОВ, м;

d – плотность АХОВ (т/м³), определяется по таблице 6.1;

K_2 – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ, определяется по таблице 6.1;

K_4 – коэффициент, учитывающий скорость ветра, определяется по таблице 6.2;

K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, определяется по таблице 6.1 (значение берется в знаменателе).

Определение эквивалентного количества химического вещества

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) по первичному облаку определяется по формуле

$$Q_{э1} = K_1 \times K_3 \times K_5 \times K_7 \times Q_0, \quad (6.4)$$

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

K_1 – коэффициент, зависящий от условий хранения АХОВ, определяется по таблице 6.1;

K_3 – коэффициент, равный отношению пороговой токсодозы хлора к пороговой токсодозе другого АХОВ, определяется по таблице 6.1;

K_5 – коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости воздуха (при инверсии – 1,0; при изотермии – 0,23; при конвекции – 0,08);

K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, определяется по таблице 6.1 (значение берется в числителе);

Q_0 – количество выброшенного (разлившегося) при аварии АХОВ, т.

Таблица 6.1 – Характеристики опасных химических веществ и вспомогательные коэффициенты для определения глубин зон заражения

Наименование АХОВ	Плотность, т/м ³		Температура кипения, °С	Пороговая токсодоза, мг·мин/л	K ₁	K ₂	K ₃	Значения вспомогательных коэффициентов K ₇				
	газ	жидкость						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
1 Акролеин	–	0,839	52,7	0,2*	0	0,013	0,75	0,1	0,2	0,4	1	2,2
Аммиак: – хранение под давлением; – изотермическое хранение	0,0008	0,681	-33,42	15	0,18	0,025	0,004	0	0,3	0,6	1	1,4
2	–	0,681	-33,42	15	0,01	0,025	0,04	0	1	1	1	1
3 Ацетонитрил	–	0,786	81,6	21,8**	0	0,004	0,28	0,02	0,1	0,3	1	2,6
4 Ацетонциангидрин	–	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	0,857	0,3	0,5	0,8	1	1,2
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	0,84	0,6	0,8	1	1,2
8 Водород бромистый	0,0036	1,49	от минус 66 до минус 77	2,4*	0,13	0,055	6	0,2	0,5	0,8	1	1,2
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	0	0	0	1	2,5
								0,1	0,3	0,8	1	1

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
11	Метиламин 0,0014	0,699	-6,5	1,2*	0,13	0,034	0,5	0 0,3	0 0,7	0,5 1	1 1	1,2 1
12	Метил бромистый	1,732	3,6	1,2	0,04	0,039	0,5	0 0,2	0 0,4	0 0,9	1 1	2,3 1
13	Метил хлористый	0,983	-23,76	10,8**	0,12 5	0,044	0,056	0 0,5	0,1 1	0,6 1	1 1	1,5 1
14	Метилакрилат	0,953	80,2	6*	0	0,005	0,025	0,1	0,2	0,4	1	3,1
15	Метил-меркаптан	0,867	5,95	1,7**	0,06	0,043	0,353	0 0,1	0 0,3	0 0,8	1 1	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	Оксиды азота	1,491	21	1,5	0	0,04	0,4	0	0	0,4	1	1
18	Оксиды этилена	0,882	10,7	2,2**	0,05	0,041	0,27	0 0,1	0 0,3	0,5 0,7	1 1	3,2 1
19	Сернистый ангидрид	1,462	-10,1	1,8	0,11	0,049	0,333	0 0,2	0 0,5	0,3 1	1 1	1,7 1
20	Сероводород	0,964	-60,35	16,1	0,27	0,042	0,036	0,3 1	0,5 1	0,8 1	1 1	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	0 0,1	0 0,4	0,5 0,9	1 1	2,2 1
24	Формальдегид	0,815	-19	0,6*	0,19	0,034	1	0 0,4	0 1	0,5 1	1 1	1,5 1

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
25	Фостан 0,0035	1,432	8,2	0,6	0,05	0,061	1	$\frac{0}{0,1}$	$\frac{0}{0,3}$	$\frac{0,5}{0,7}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{2,7}{1}$
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	Этиленмин -	0,838	55	4,8	0	0,009	0,125	0,05	0,1	0,4	1	2,2

Примечания

1 Плотности газообразных АХОВ в графе 3 приведены для атмосферного давления; при давлении в резервуаре, отличном от атмосферного, плотности газообразных АХОВ определяются путем умножения данных графы 3 на значения давления в кг·с/см².

2 В графах 10–14 в числителе значения K_7 для первичного, в знаменателе – для вторичного облака.

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

$$П = 240 \times K \times ПДК_{р,3},$$

где П – токсодоза, мг · мин/л;

ПДК_{р,3} – 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 K_1 для изотермического хранения аммиака приведено для случая разливов (выбросов) в поддон.

Таблица 6.2 – 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 6.3.

Таблица 6.3 – Таблица для определения степени вертикальной устойчивости воздуха (коэффициент K_5)

Скорость ветра по прогнозу, м/с	Ночь		Утро		День		Вечер	
	ясно, перем. облачн.	сплошная облачн.	ясно, перем. облачн.	сплошная облачн.	ясно, перем. облачн.	сплошная облачн.	ясно, перем. облачн.	сплошная облачн.
<2	ин	из	из (ин)	из	к (из)	из	ин	из
2-4	ин	из	из (ин)	из	к (из)	из	из (ин)	из
>4	из	из	из	из	из	из	из	из

Примечания

1 «Из» – изотермия, «ин» – инверсия, «к» – конвекция, буквы в скобках – при снежном покрове.

2 «Утро» – период времени, равный двум часам после восхода солнца, «вечер» – равный двум часам после захода солнца. Промежутки времени между «утром» и «вечером» и между «вечером» и «утром» – соответственно «день» и «ночь».

Эквивалентное количество АХОВ по вторичному облаку ($Q_{э2}$, т) рассчитывается по формуле

$$Q_{э2} = (1 - K_1) \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5 \times K_6 \times K_7 \times \frac{Q_0}{h \times d}, \quad (6.5)$$

где K_1, K_3, K_5, K_7, Q_0 – см. формулу (6.4) (значение K_7 берется в знаменателе);

K_2, K_4, K_7, h, d – см. формулу (6.3);

K_6 – коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после аварии ($T_{ав}$, ч).

Значение коэффициента K_6 определяется после расчета продолжительности испарения ($T_{исп}$, ч) пролива АХОВ:

$$K_6 = \begin{cases} T_{ав}^{0,8} & \text{при } T_{ав} < T_{исп} \\ T_{исп}^{0,8} & \text{при } T_{ав} \geq T_{исп} \end{cases}, \quad (6.6)$$

где K_6 принимается для 1 ч при $T_{исп} < 1$ ч;

$T_{ав}$ – время от начала аварии, ч.

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 6.4. 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 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 (6.4) и (6.5) эквивалентного количества вещества и скорости ветра по таблице 6.4 определяют глубины заражения первичным Γ_1 и (или) вторичным Γ_2 облаком АХОВ.

Так как сжиженные газы образуют при аварии первичное и вторичное облако, то полная глубина зоны заражения (Γ , км) на время испарения или время, прошедшее после аварии, определяется по формуле

$$\Gamma = \max\{\Gamma_1, \Gamma_2\} + 0,5 \min\{\Gamma_1, \Gamma_2\}. \quad (6.7)$$

Полученное значение сравнивается с предельно возможным значением глубины переноса воздушных масс $\Gamma_{\text{пред}}$.

Предельное значение глубины переноса зараженного воздуха АХОВ ($\Gamma_{\text{п}}$, км) определяется по формуле

$$\Gamma_{\text{п}} = T_{\text{ав}} \times V_{\text{п}}, \quad (6.8)$$

где $V_{\text{п}}$ – скорость переноса зараженного воздуха (км/ч), определяется по таблице 6.5.

Таблица 6.4 – Глубины зон 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																
	Глубина возможного заражения, км																
	0,01	0,05	0,1	0,5	1	3	5	10	20	30	50	70	100	300	500	1000	2000
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 6.5 – Скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха, км/ч

Состояние приземного слоя воздуха	Скорость ветра по данным прогноза, 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	–	–	–	–	–	–	–	–	–

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

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

$$\text{если } \Gamma_{\text{п}} > \Gamma_{\text{пред}}, \text{ то } \Gamma_{\text{расч}} = \Gamma_{\text{пред}}; \quad (6.9)$$

$$\text{если } \Gamma_{\text{п}} < \Gamma_{\text{пред}}, \text{ то } \Gamma_{\text{расч}} = \Gamma_{\text{п}}.$$

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

Определение площадей зоны заражения

Определяют 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_B , км²) определяется по формуле

$$S_B = \frac{\pi \times \Gamma_{\text{расч}}^2}{360} \times \varphi, \quad (6.10)$$

где S_B – площадь зоны возможного заражения, км²;

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

φ – угол сектора вероятного изменения направления ветра (град), определяемый в зависимости от скорости ветра по таблице 6.6.

Таблица 6.6 – Угловые размеры зоны возможного заражения АХОВ

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

Площадь зоны фактического заражения (S_Φ , км²) определяется по формуле

$$S_\Phi = K_8 \times \Gamma_{\text{расч}}^2 \times T_{\text{ав}}^{0,2}, \quad (6.11)$$

где S_Φ – 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);

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

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

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

Зона фактического заражения имеет форму эллипса, большая ось которого равна расчетной глубине зоны заражения, а малая – зависит от площади фактического заражения и определяется по формуле

$$a = \frac{4S_\Phi}{\pi \times \Gamma_{\text{расч}}}, \quad (6.12)$$

где a – ширина зоны фактического заражения, км.

Порядок нанесения зон заражения на карту и схему

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 6.6, а радиус равен расчетной глубине зоны заражения ($\Gamma_{\text{расч}}$). 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 следующие данные:

- в числителе – наименование и количество выброшенного в окружающую среду АХОВ;
- в знаменателе – дата и время выброса ядовитого вещества.

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 6.1.

При скорости ветра от 1,1 до 2 м/с схема зоны химического заражения будет иметь вид, показанный на рисунке 6.2.

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 6.3).

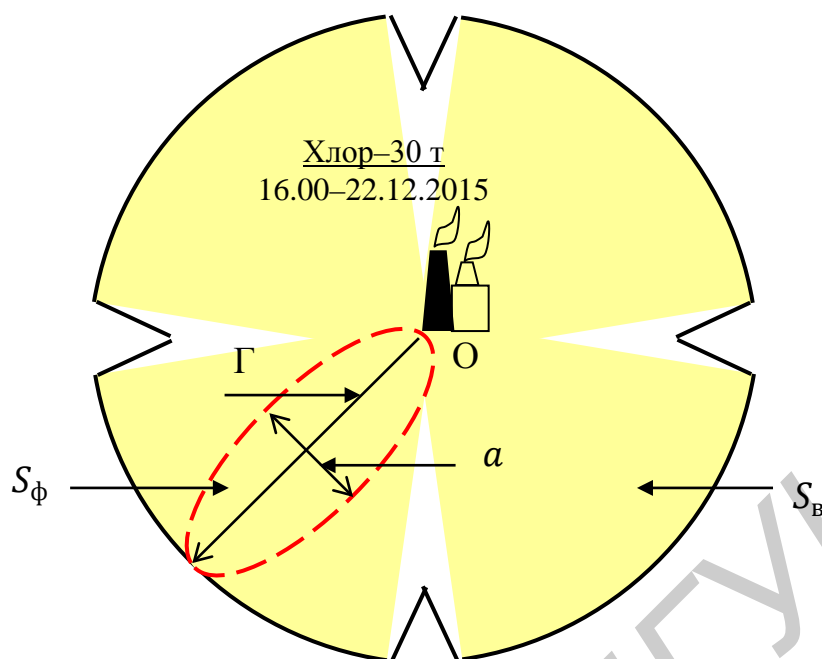


Рисунок 6.1 – Схема зоны химического заражения территории при скорости ветра меньше 0,5 м/с

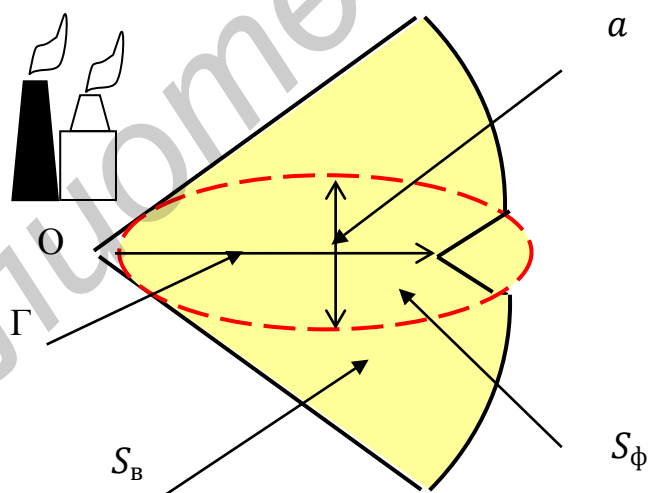
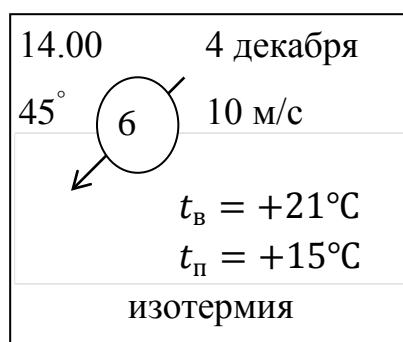


Рисунок 6.2 – Схема зоны химического заражения территории при скорости ветра от 1,1 до 2 м/с



14.00, 4 декабря – время, число и месяц, на которые даются метеоусловия;
 45° – направление ветра в градусах; 10 – скорость ветра, м/с;
 6 – облачность в баллах; $t_{\text{в}}$ – температура воздуха, °С;
 $t_{\text{п}}$ – температура почвы, °С; изотермия – степень вертикальной устойчивости

Рисунок 6.3 – Характеристика метеоусловий

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 6.7 в зависимости от обеспеченности людей средствами индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД) и условий нахождения людей.

Таблица 6.7 – 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

$$N = S_{\phi} \left[\frac{\Gamma_r}{\Gamma_{\text{расч}}} \times \rho \times K + \left(1 - \frac{\Gamma_r}{\Gamma_{\text{расч}}} \right) \times \rho' \times K' \right], \quad (6.13)$$

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, км;

$\Gamma_{\text{расч}}$ – 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:

$$K = (1 - n_1)(1 - n_2), \quad (6.14)$$

$$K' = (1 - n'_1)(1 - n'_2), \quad (6.15)$$

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.

Определение времени подхода облака зараженного воздуха к объекту

Алгоритм определения ожидаемого времени распространения химической зоны заражения до объекта экономики приведен на рисунке 6.4. В качестве расчетной глубины заражения при этом принимается расстояние L от химически опасного объекта до объекта экономики (ОЭ).

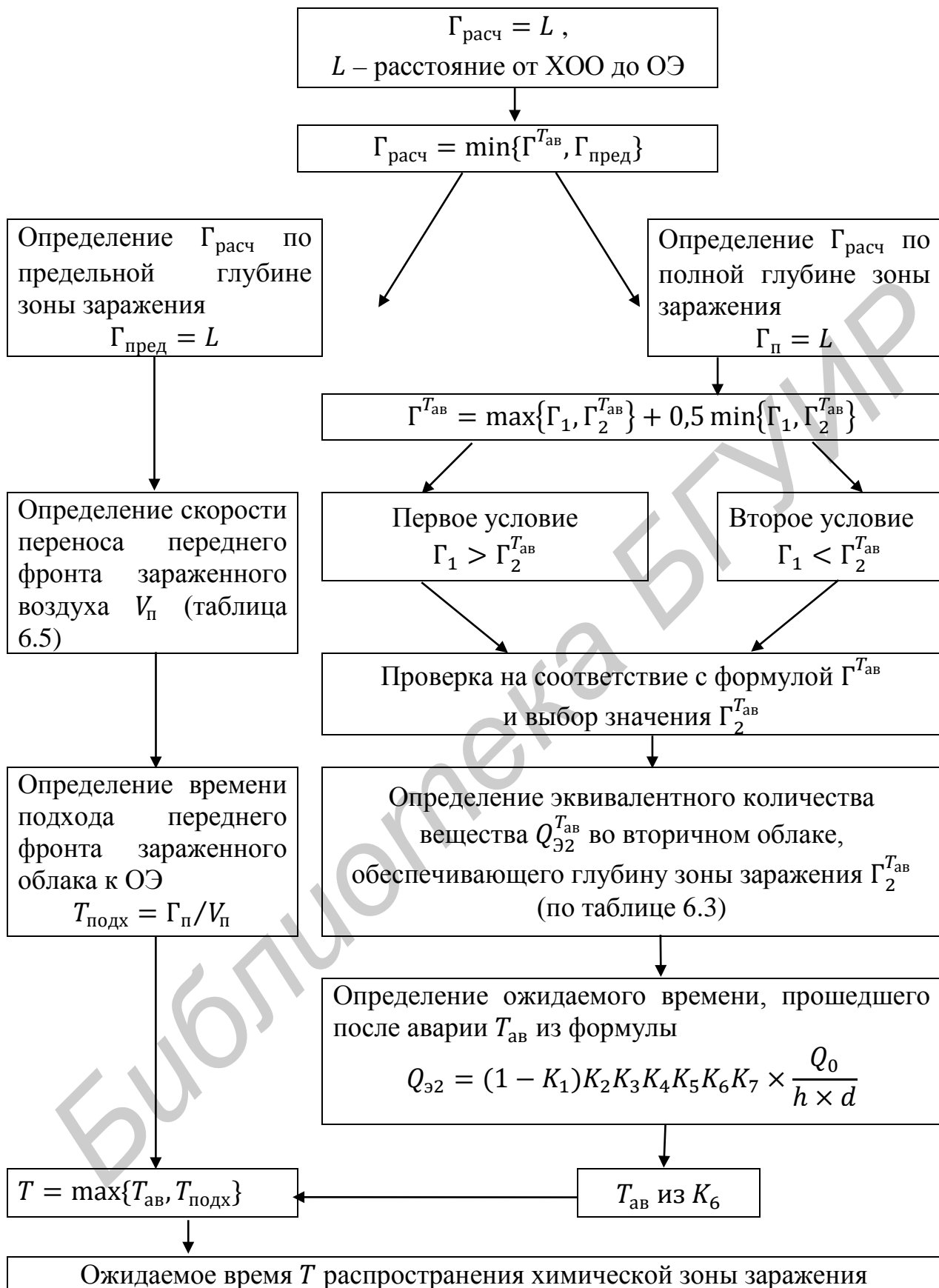


Рисунок 6.4 – Алгоритм определения времени распространения зоны химического заражения до объекта экономики

Пример решения задачи

Задача. Оценить обстановку при аварии на химически опасном объекте и построить ситуационный план аварии. Для это определить продолжительность действия химического источника заражения, определить глубину и площади зон возможного и фактического химического заражения на время после аварии (1, 2, 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. Ситуационный план должен быть выполнен в цвете с указанием границ зон возможного и фактического заражения.

Исходные данные:

- АХОВ – 380 т хлора (сжиженное состояние);
- дата и время аварии – 25 июля, 3.00 ч;
- метеоусловия: ясно, скорость ветра – 1,8 м/с, направление ветра – 340 град, температура воздуха – плюс 16 °С;
- высота обваловки – 3 м;
- глубина зоны заражения в городе Γ_r в долях от $\Gamma_{расч}$ – 0,7;
- средняя плотность населения в городе ρ – 2800 чел./км²;
- средняя плотность населения в загородной зоне ρ' – 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 ОЭ до ХОО L – 60 км.

Решение.

1 Определим время испарения АХОВ.

Толщина слоя разлившегося хлора рассчитывается по формуле (6.1):

$$h = 3 - 0,2 = 2,8 \text{ м.}$$

Плотность хлора $d = 1,558 \text{ т/м}^3$ (см. таблицу 6.1).

$K_2 = 0,052$ – коэффициент, зависящий от физико-химических свойств АХОВ, определяется по таблице 6.1.

K_4 определяется по таблице 6.2. Определим K_4 при скорости ветра 1,8 м/с (рисунок 6.5): для $v = 1 \text{ м/с} \Rightarrow K_4 = 1$; для $v = 2 \text{ м/с} \Rightarrow K_4 = 1,33$;

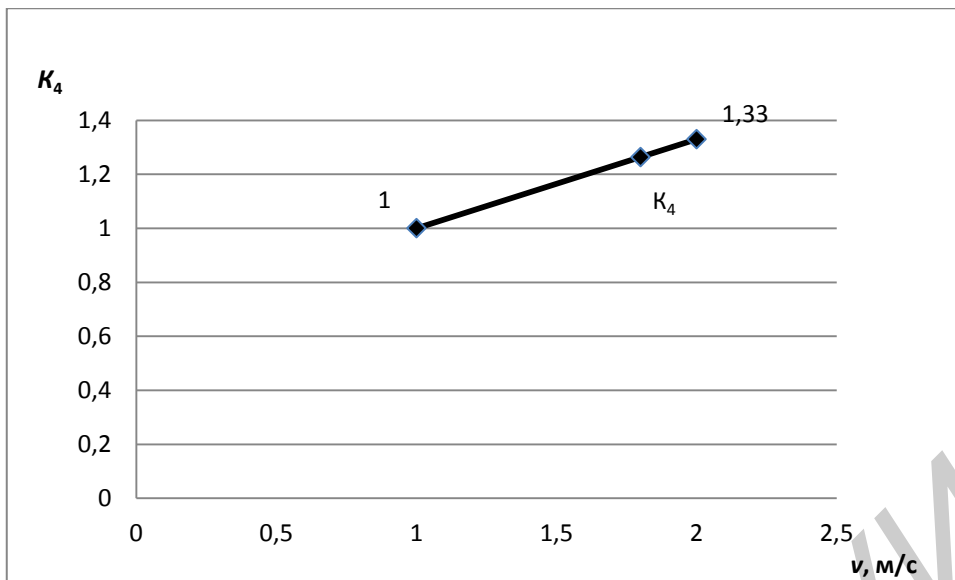


Рисунок 6.5 – Определение K_4 при скорости ветра 1,8 м/с

Следуя рисунку 6.5, составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 = 1k + b, \\ 1,33 = 2k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 0,67 \\ k = 0,33 \end{cases}.$$

Составим уравнение для K_4 при скорости ветра 1,8 м/с:

$$K_4 = 1,8k + b = 1,8 \times 0,33 + 0,67 = 1,264.$$

$K_7 = 1$ (из таблицы 6.1 для температуры 16 °С).

Тогда время испарения АХОВ (согласно формуле 6.3) равно

$$T_{\text{исп}} = \frac{2,8 \times 1,558}{0,052 \times 1,264 \times 1} = 66,37 \text{ ч.}$$

2 Определим эквивалентное количество химического вещества.

Так как хлор находится в сжиженном состоянии, то образуется как первичное, так и вторичное облако.

Эквивалентное количество АХОВ по первичному облаку определяется по формуле (6.4):

$$Q_{\text{э1}} = K_1 \times K_3 \times K_5 \times K_7 \times Q_0,$$

где $Q_0 = 380$ т – количество хлора в емкости;

$K_1 = 0,18$ – коэффициент, зависящий от условий хранения АХОВ, определяется по таблице 6.1;

$K_3 = 1$ (определяется по таблице 6.1);

K_5 – коэффициент, учитывающий степень вертикальной устойчивости воздуха. Так как авария произошла ночью при ясной погоде, то степень вертикальной устойчивости атмосферы по таблице 6.3 – инверсия. Тогда $K_5 = 1$;

K_7 – коэффициент, учитывающий влияние температуры воздуха, определяется по таблице 6.1 для температуры 16 °С.

Определим K_7 при скорости ветра 1,8 м/с:

для $T = 0$ °С $\Rightarrow K_7 = 0,6$; для $T = 20$ °С $\Rightarrow K_7 = 1$;

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 0,6 = 0k + b, \\ 1 = 20k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 0,6 \\ k = 0,02 \end{cases};$$

для температуры 16 °С $\Rightarrow K_7 = 16k + b = 0,02 \times 16 + 0,6 = 0,92$.

Определим эквивалентное количество АХОВ по первичному облаку:

$$Q_{\text{э1}} = 0,18 \times 1 \times 1 \times 0,92 \times 380 = 62,928 \text{ т.}$$

Эквивалентное количество хлора по вторичному облаку определяется по формуле (6.5):

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

где $K_2 = 0,052$ (определяется по таблице 6.1);

K_6 – коэффициент, зависящий от времени, прошедшего после аварии ($T_{\text{ав}}$), или времени испарения АХОВ ($T_{\text{исп}}$, ч), определяется согласно формуле (6.6);

$K_7 = 1$ (определяется по таблице 6.1 для температуры 16 °С, берется в знаменателе).

Определим эквивалентное количество хлора по вторичному облаку:

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

$$Q_{Э2} = (1 - 0,18) \times 0,052 \times 1 \times 1,264 \times 1 \times 1 \times 1 \times \frac{380}{2,8 \times 1,558} = 4,695 \text{ т};$$

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

$$Q_{Э2} = (1 - 0,18) \times 0,052 \times 1 \times 1,264 \times 1,741 \times 1 \times \frac{380}{2,8 \times 1,558} = 8,174 \text{ т};$$

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

$$Q_{Э2} = (1 - 0,18) \times 0,052 \times 1 \times 1,264 \times 3,031 \times 1 \times \frac{380}{2,8 \times 1,558} = 14,232 \text{ т};$$

при $T_{ав} = 66,37$ ч, $T_{ав} \geq T_{исп} \Rightarrow K_6 = 66,37^{0,8} = 28,68$,

$$Q_{Э2} = (1 - 0,18) \times 0,052 \times 1 \times 1,264 \times 28,68 \times 1 \times \frac{380}{2,8 \times 1,558} = 134,649 \text{ т}.$$

3 Определим глубину зоны химического заражения.

По таблице 6.4 в зависимости от скорости ветра и эквивалентного количества АХОВ определим глубину зоны заражения первичным (Γ_1) и вторичным (Γ_2) облаком.

Значение $Q_{Э1} = 62,928$ т находится в таблице 6.4 в интервале от 50 до 70 т. Скорость ветра 1,8 м/с находится в интервале от 1 до 2 м/с.

Определим значение Γ_1 для $Q_{Э1} = 62,928$ т и скорости ветра 1,8 м/с.

Сначала определим значение Γ_1 при скорости ветра 1 м/с:

для $Q_{Э1} = 50$ т $\Rightarrow \Gamma_1 = 52,67$ км; для $Q_{Э1} = 70$ т $\Rightarrow \Gamma_1 = 65,23$ км;

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 52,67 = 50k + b, \\ 65,23 = 70k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 21,27 \\ k = 0,628 \end{cases};$$

при $v = 1$ м/с $\Rightarrow \Gamma_1 = 62,928k + b = 62,928 \times 0,628 + 21,27 = 60,788$ км.

Определим Γ_1 при скорости ветра 2 м/с:

для $Q_{Э1} = 50$ т $\Rightarrow \Gamma_1 = 28,73$ км; для $Q_{Э1} = 70$ т $\Rightarrow \Gamma_1 = 35,35$ км;

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 28,73 = 50k + b, \\ 35,35 = 70k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 12,18 ; \\ k = 0,331 ; \end{cases}$$

при $v = 2$ м/с $\Rightarrow \Gamma_1 = 62,928k + b = 62,928 \times 0,331 + 12,18 = 33,009$ км.

Определим Γ_1 при скорости ветра 1,8 м/с:

при $v = 1$ м/с $\Rightarrow \Gamma_1 = 60,788$ км; при $v = 2$ м/с $\Rightarrow \Gamma_1 = 33,009$ км;

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = -kx_1 + b, \\ y_2 = -kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 60,788 = -1k + b, \\ 33,009 = -2k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 88,567 ; \\ k = 27,779 ; \end{cases}$$

при $v = 1,8$ м/с $\Rightarrow \Gamma_1 = -1,8k + b = -1,8 \times 27,779 + 88,567 = 38,565$ км.

Таким образом, для $Q_{Э1} = 62,928$ т $\Rightarrow \Gamma_1 = 38,565$ км.

Значение Γ_2 при $T_{ав} = 1, 2, 4$ и $66,37$ ч, в зависимости от величины $Q_{Э2}$ для скорости ветра 1,8 м/с, определяется аналогично.

При $T_{ав} = 1$ ч значение $Q_{Э2} = 4,695$ т. Значение $Q_{Э2}$ находится в таблице 6.4 в интервале от 3 до 5 т. Скорость ветра 1,8 м/с находится в интервале от 1 до 2 м/с.

Определим значение Γ_2 для $Q_{Э2} = 4,695$ т при скорости ветра 1,8 м/с.

Сначала определим значение Γ_2 при скорости ветра 1 м/с:

для $Q_{Э2} = 3$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 9,18$ км; для $Q_{Э2} = 5$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 12,53$ км;

составим систему уравнений для прямой и найдем значение Γ_2 при скорости ветра 1 м/с:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 9,18 = 3k + b, \\ 12,53 = 5k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 4,155 ; \\ k = 1,675 ; \end{cases}$$

при $v = 1$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = 4,695k + b = 4,695 \times 1,675 + 4,155 = 12,019$ км.

Определим значение Γ_2 при скорости ветра 2 м/с:

для $Q_{Э2} = 3$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 5,35$ км; для $Q_{Э2} = 5$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 7,20$ км;

составим систему уравнений для прямой и найдем значение Γ_2 при скорости ветра 2 м/с:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 5,35 = 3k + b, \\ 7,2 = 5k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 2,575 \\ k = 0,925 \end{cases};$$

при $v = 2$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = 4,695k + b = 4,695 \times 0,925 + 2,575 = 6,918$ км.

Определим значение Γ_2 при скорости ветра 1,8 м/с:

при $v = 1$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = 12,019$ км; при $v = 2$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = 6,918$ км;

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = -kx_1 + b, \\ y_2 = -kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 12,019 = -1k + b, \\ 6,918 = -2k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 17,12 \\ k = 5,101 \end{cases};$$

при $v = 1,8$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = -1,8k + b = -1,8 \times 5,101 + 17,12 = 7,938$ км.

При $T_{ав} = 2$ ч значение $Q_{Э2} = 8,174$ т. Значение $Q_{Э2}$ находится в таблице 6.4 в интервале от 5 до 10 т. Скорость ветра 1,8 м/с находится в интервале от 1 до 2 м/с.

Определим значение Γ_2 для $Q_{Э2} = 8,174$ т при скорости ветра 1,8 м/с.

Сначала определим значение Γ_2 при скорости ветра 1 м/с:

для $Q_{Э2} = 5$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 12,53$ км; для $Q_{Э2} = 10$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 19,2$ км;

составим систему уравнений для прямой и найдем значение Γ_2 при скорости ветра 1 м/с:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 12,53 = 5k + b, \\ 19,2 = 10k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 5,86 \\ k = 1,334 \end{cases};$$

при $v = 1$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = 8,174k + b = 8,174 \times 1,334 + 5,86 = 16,764$ км.

Определим значение Γ_2 при скорости ветра 2 м/с:

для $Q_{\text{Э2}} = 5$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 7,2$ км; для $Q_{\text{Э2}} = 10$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 10,83$ км;

составим систему уравнений для прямой и найдем значение Γ_2 при скорости ветра 2 м/с:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 7,2 = 5k + b, \\ 10,83 = 10k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 3,57 \\ k = 0,726 \end{cases};$$

при $v = 2$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = 8,174k + b = 8,174 \times 0,726 + 3,57 = 9,504$ км.

Определим значение Γ_2 при скорости ветра 1,8 м/с:

при $v = 1$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = 16,764$ км; при $v = 2$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = 9,504$ км;

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = -kx_1 + b, \\ y_2 = -kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 16,764 = -1k + b, \\ 9,504 = -2k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 24,024 \\ k = 7,26 \end{cases};$$

при $v = 1,8$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = -1,8k + b = -1,8 \times 7,26 + 24,024 = 10,956$ км.

При $T_{\text{ав}} = 4$ ч значение $Q_{\text{Э2}} = 14,232$ т. Значение $Q_{\text{Э2}}$ находится в таблице 6.4 в интервале от 10 до 20 т. Скорость ветра 1,8 м/с находится в интервале от 1 до 2 м/с.

Определим значение Γ_2 для $Q_{\text{Э2}} = 14,232$ т при скорости ветра 1,8 м/с.

Сначала определим значение Γ_2 при скорости ветра 1 м/с:

для $Q_{\text{Э2}} = 10$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 19,2$ км; для $Q_{\text{Э2}} = 20$ т $\Rightarrow \Gamma_2 = 29,56$ км;

составим систему уравнений для прямой и найдем значение Γ_2 при скорости ветра 1 м/с:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 19,2 = 10k + b, \\ 29,56 = 20k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 8,84 \\ k = 1,036 \end{cases};$$

при $v = 1$ м/с $\Rightarrow \Gamma_2 = 14,232k + b = 14,232 \times 1,036 + 8,84 = 23,584$ км.

Определим значение Γ_2 при скорости ветра 2 м/с:

для $Q_{\text{Э2}} = 10 \text{ т} \Rightarrow \Gamma_2 = 10,83 \text{ км}$; для $Q_{\text{Э2}} = 20 \text{ т} \Rightarrow \Gamma_2 = 16,44 \text{ км}$;

составим систему уравнений для прямой и найдем значение Γ_2 при скорости ветра 2 м/с:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 10,83 = 10k + b, \\ 16,44 = 20k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 5,22 \\ k = 0,561 \end{cases};$$

при $v = 2 \text{ м/с} \Rightarrow \Gamma_2 = 14,232k + b = 14,232 \times 0,561 + 5,22 = 13,204 \text{ км}$.

Определим значение Γ_2 при скорости ветра 1,8 м/с:

при $v = 1 \text{ м/с} \Rightarrow \Gamma_2 = 23,584 \text{ км}$; при $v = 2 \text{ м/с} \Rightarrow \Gamma_2 = 13,204 \text{ км}$;

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = -kx_1 + b, \\ y_2 = -kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 23,584 = -1k + b, \\ 13,204 = -2k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 33,964 \\ k = 10,38 \end{cases};$$

при $v = 1,8 \text{ м/с} \Rightarrow \Gamma_2 = -1,8k + b = -1,8 \times 10,38 + 33,964 = 15,28 \text{ км}$.

При $T_{\text{ав}} = 66,37 \text{ ч}$ значение $Q_{\text{Э2}} = 134,649 \text{ т}$. Значение $Q_{\text{Э2}}$ находится в таблице 6.4 в интервале от 100 до 300 т. Скорость ветра 1,8 м/с находится в интервале от 1 до 2 м/с.

Определим Γ_2 для $Q_{\text{Э2}} = 134,649 \text{ т}$ при скорости ветра 1,8 м/с.

Сначала определим значение Γ_2 при скорости ветра 1 м/с:

для $Q_{\text{Э2}} = 100 \text{ т} \Rightarrow \Gamma_2 = 81,91 \text{ км}$; для $Q_{\text{Э2}} = 300 \text{ т} \Rightarrow \Gamma_2 = 166 \text{ км}$;

составим систему уравнений для прямой и найдем значение Γ_2 при скорости ветра 1 м/с:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 81,91 = 100k + b, \\ 166 = 300k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 39,91 \\ k = 0,42 \end{cases};$$

при $v = 1 \text{ м/с} \Rightarrow \Gamma_2 = 134,649k + b = 134,649 \times 0,42 + 39,91 = 96,463 \text{ км}$.

Определим значение Γ_2 при скорости ветра 2 м/с:

для $Q_{\text{Э2}} = 100 \text{ т} \Rightarrow \Gamma_2 = 44,09 \text{ км}$; для $Q_{\text{Э2}} = 300 \text{ т} \Rightarrow \Gamma_2 = 87,79 \text{ км}$;

составим систему уравнений для прямой и найдем значение Γ_2 при скорости ветра 2 м/с:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 44,09 = 100k + b, \\ 87,79 = 300k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 22,18 \\ k = 0,219 \end{cases};$$

при $v = 2 \text{ м/с} \Rightarrow \Gamma_2 = 134,649k + b = 134,649 \times 0,219 + 22,18 = 51,668 \text{ км}$.

Определим значение Γ_2 при скорости ветра 1,8 м/с:

при $v = 1 \text{ м/с} \Rightarrow \Gamma_2 = 96,463 \text{ км}$; при $v = 2 \text{ м/с} \Rightarrow \Gamma_2 = 51,668 \text{ км}$;

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = -kx_1 + b, \\ y_2 = -kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 96,463 = -1k + b, \\ 51,668 = -2k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 141,258 \\ k = 44,795 \end{cases};$$

при $v = 1,8 \text{ м/с} \Rightarrow \Gamma_2 = -1,8k + b = -1,8 \times 44,795 + 141,258 = 60,627 \text{ км}$.

4 Определим полную глубину зоны заражения по формуле (6.7):

при $T_{\text{ав}} = 1 \text{ ч}$, $\Gamma = 38,565 + 0,5 \times 7,938 = 42,534 \text{ км}$;

при $T_{\text{ав}} = 2 \text{ ч}$, $\Gamma = 38,565 + 0,5 \times 10,956 = 44,043 \text{ км}$;

при $T_{\text{ав}} = 4 \text{ ч}$, $\Gamma = 38,565 + 0,5 \times 15,28 = 46,205 \text{ км}$;

при $T_{\text{ав}} = 66,37 \text{ ч}$, $\Gamma = 60,627 + 0,5 \times 38,565 = 79,91 \text{ км}$.

5 Определим предельное значение глубины переноса переднего фронта зараженного воздуха по формуле (6.8).

В таблице 6.5 скорость ветра 1,8 м/с находится в интервале от 1 до 2 м/с. Определим, что скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха при инверсии равна 9 км/ч. Тогда

при $T_{ав} = 1$ ч, $\Gamma_{п} = 1 \times 9 = 9$ км;

при $T_{ав} = 2$ ч, $\Gamma_{п} = 2 \times 9 = 18$ км;

при $T_{ав} = 4$ ч, $\Gamma_{п} = 4 \times 9 = 36$ км;

при $T_{ав} = 66,37$ ч, $\Gamma_{п} = 66,37 \times 9 = 597,33$ км.

6 Определим расчетное значение глубины зоны заражения АХОВ.

Для АХОВ, хранящихся в виде сжиженных газов, $\Gamma_{расч}$ определяется из соотношений (6.9):

при $T_{ав} = 1$ ч, $\Gamma > \Gamma_{п}$, следовательно $\Gamma_{расч} = \Gamma_{п} = 9$ км;

при $T_{ав} = 2$ ч, $\Gamma > \Gamma_{п}$, следовательно $\Gamma_{расч} = \Gamma_{п} = 18$ км;

при $T_{ав} = 4$ ч, $\Gamma > \Gamma_{п}$, следовательно $\Gamma_{расч} = \Gamma_{п} = 36$ км;

при $T_{ав} = 66,37$ ч, $\Gamma < \Gamma_{п}$, следовательно $\Gamma_{расч} = \Gamma = 79,9$ км.

7 Определим площади зон возможного заражения. Площадь зоны возможного заражения определяется по формуле (6.10) при скорости ветра 1,8 м/с, $\varphi = 90^\circ$ (согласно таблице 6.6):

при $T_{ав} = 1$ ч, $S_{в} = \frac{3,14 \times 9^2}{360} \times 90 = 63,59$ км²;

при $T_{ав} = 2$ ч, $S_{в} = \frac{3,14 \times 18^2}{360} \times 90 = 254,34$ км²;

при $T_{ав} = 4$ ч, $S_{в} = \frac{3,14 \times 36^2}{360} \times 90 = 1017,36$ км²;

при $T_{ав} = 66,37$ ч, $S_{в} = \frac{3,14 \times 79,9^2}{360} \times 90 = 5011,45$ км².

Площадь зоны фактического заражения определяем по формуле (6.11), для инверсии $K_8 = 0,081$:

$$\text{при } T_{\text{ав}} = 1 \text{ ч, } S_{\phi} = 0,081 \times 9^2 \times 1^{0,2} = 6,561 \text{ км}^2;$$

$$\text{при } T_{\text{ав}} = 2 \text{ ч, } S_{\phi} = 0,081 \times 18^2 \times 2^{0,2} = 30,146 \text{ км}^2;$$

$$\text{при } T_{\text{ав}} = 4 \text{ ч, } S_{\phi} = 0,081 \times 36^2 \times 4^{0,2} = 138,517 \text{ км}^2.$$

Площадь зоны фактического заражения за 66,37 не определяется, т. к. оно длится больше 4 ч и велика вероятность изменения направления ветра.

8 Определим ширину зоны фактического заражения по формуле (6.12):

$$\text{при } T_{\text{ав}} = 1 \text{ ч, } a = \frac{4 \times 6,561}{3,14 \times 9} = 0,929 \text{ км};$$

$$\text{при } T_{\text{ав}} = 2 \text{ ч, } a = \frac{4 \times 30,146}{3,14 \times 18} = 2,133 \text{ км};$$

$$\text{при } T_{\text{ав}} = 4 \text{ ч, } a = \frac{4 \times 138,517}{3,14 \times 36} = 4,902 \text{ км}.$$

9 Определим ожидаемое время распространения зоны химического заражения до объекта экономики.

Принимаем $\Gamma_{\text{расч}} = L = 60$ км, где L – расстояние от ХОО до объекта экономики, км.

Расчетная глубина зоны химического заражения определяется по формуле

$$\Gamma_{\text{расч}} = \min \{ \Gamma, \Gamma_{\text{п}} \}.$$

Находим значения величин Γ и $\Gamma_{\text{п}}$.

При расчете по полной глубине имеем $\Gamma_{\text{расч}} = \Gamma = L = 60$ км. Величина Γ определяется по формуле (6.7).

В этом выражении неизвестна глубина зоны заражения по вторичному облаку, которое обеспечивает $\Gamma = 60$ км.

Решение этого уравнения может быть выполнено при двух условиях: $\Gamma_1 > \Gamma_2$ или $\Gamma_1 < \Gamma_2$. Проверяем выполнение условий.

Первое условие $\Gamma_1 > \Gamma_2$:

$$60 = 38,57 + 0,5\Gamma_2,$$

отсюда $\Gamma_2 = 42,86$ км, значит это условие не выполняется; т. к. $38,57 < 42,86$.

Второе условие $\Gamma_1 < \Gamma_2$:

$$60 = \Gamma_2 + 0,5 \times 38,57;$$

отсюда $\Gamma_2 = 40,72$ км, значит это условие выполняется, т. к. $38,57 < 40,72$.

Определим по таблице 6.4 эквивалентное количество вещества во вторичном облаке, обеспечивающее глубину зоны химического заражения $\Gamma_2 = 40,72$ км (ниже представлен фрагмент таблицы 6.4).

$v, \text{ м/с}$	$Q_{\text{Э2}}, \text{ т}$	
	50	70
1	52,67	65,23
2	28,73	35,35

Найдем $Q_{\text{Э2}}$, обеспечивающее глубину зоны заражения $\Gamma_2 = 40,72$ км. Для этого сначала находим глубину заражения для эквивалентного количества вещества 70 и 50 т при скорости ветра 1,8 м/с.

Определим Γ_2 в интервале скорости ветра 1–2 м/с для $Q_{\text{Э2}} = 70$ т:

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = -kx_1 + b, \\ y_2 = -kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 65,23 = -1k + b, \\ 35,35 = -2k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 95,13 \\ k = 29,9 \end{cases};$$

тогда $\Gamma_2 = -1,8k + b = -1,8 \times 29,9 + 95,13 = 41,31$ км.

Определим Γ_2 в интервале скорости ветра 1–2 м/с для $Q_{\text{Э2}} = 50$ т:

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = -kx_1 + b, \\ y_2 = -kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 52,67 = -1k + b, \\ 28,73 = -2k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 76,61 \\ k = 23,94 \end{cases};$$

тогда $\Gamma_2 = -1,8k + b = -1,8 \times 23,94 + 76,61 = 33,518$ км.

Теперь определяем эквивалентное количество вещества во вторичном облаке $Q_{\text{Э2}}$ для $\Gamma_2 = 40,72$ км:

составим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = kx_1 + b, \\ y_2 = kx_2 + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 33,518 = 50k + b, \\ 41,31 = 70k + b, \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} b = 14,018 \\ k = 0,39 \end{cases};$$

$$40,72 = Q_{\text{Э2}}k + b;$$

$$Q_{\text{Э2}} = \frac{40,72 - b}{k} = \frac{40,72 - 14,018}{0,39} = 68,467 \text{ т.}$$

Таким образом, глубину зоны заражения $\Gamma_2 = 40,72$ км обеспечивает эквивалентное количество вещества $Q_{\text{Э2}} = 68,467$ т.

Определяем K_6 из формулы (6.5):

$$K_6 = \frac{68,467 \times 2,8 \times 1,558}{0,82 \times 0,052 \times 1 \times 1,264 \times 1 \times 0,92 \times 380} = 15,899.$$

Коэффициент K_6 зависит от времени, прошедшего после аварии, и определяется как

$$K_6 = T_{\text{ав}}^{0,8} \Rightarrow T_{\text{ав}} = \sqrt[0,8]{K_6} \text{ ч.}$$

Определяем ожидаемое время распространения зоны химического заражения до объекта экономики:

$$T_{\text{ав}} = \sqrt[0,8]{K_6} = 31,75 \text{ ч.}$$

При расчете по полной глубине определяем время подхода переднего фронта зараженного воздуха к объекту экономики (ранее определили, что скорость переноса переднего фронта облака зараженного воздуха при инверсии равна 9 км/ч):

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

Ожидаемое время распространения химической зоны заражения равно

$$T_{\text{ожид}} = \max\{T_{\text{подх}}, T_{\text{ав}}\} = 31,75 \text{ ч} = 31 \text{ ч } 45 \text{ мин.}$$

10 Нанесем химическую обстановку на карту (схему), используя полученные расчетные данные.

Зона возможного заражения ограничена сектором с углом 90° , т. к. скорость ветра составляет 1,8 м/с, т. е. находится в интервале от 1,1 до 2 м/с.

Зона возможного заражения штрихуется. Зона фактического заражения имеет форму эллипса и наносится пунктиром.

11 Определим возможные потери населения при аварии на ХОО.

Доля незащищенного населения составит (по формулам (6.14), (6.15)):

$$\text{– в городе: } K = (1 - 0,47)(1 - 0,38) = 0,329;$$

$$\text{– в загородной зоне: } K' = (1 - 0,08)(1 - 0,03) = 0,892.$$

Возможные общие потери населения в очаге поражения АХОВ определяются по формуле (6.13) ($S_{\text{ф}}$ и $\Gamma_{\text{расч}}$ берется при $T_{\text{ав}} = 4 \text{ ч}$):

$$\begin{aligned} N &= 138,517 \times \left[\frac{0,7 \times 36}{36} \times 2800 \times 0,329 + \left(1 - \frac{0,7 \times 36}{36} \right) \times 189 \times 0,892 \right] = \\ &= 96 \ 326 \text{ чел.} \end{aligned}$$

Ориентировочная структура потерь людей в очаге поражения АХОВ составит:

– санитарные потери легкой формы тяжести (I степень):

$$96 \ 326 \times 0,25 = 24 \ 081 \text{ чел. ;}$$

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

$$96 \ 326 \times 0,4 = 38 \ 530 \text{ чел. ;}$$

– безвозвратные потери (смертельный исход) (IV степень):

$$96 \ 326 \times 0,35 = 33 \ 714 \text{ чел.}$$

Возможное количество пораженных людей и структура их поражения в городе

$$N_{\Gamma} = 138,517 \times (0,7 \times 2800 \times 0,329) = 89\,321 \text{ чел.},$$

из них:

$$\text{I степени (25 \%)} - 89\,321 \times 0,25 = 22\,330 \text{ чел.};$$

$$\text{II и III степени (40 \%)} - 89\,321 \times 0,4 = 35\,728 \text{ чел.};$$

$$\text{IV степени (35 \%)} - 89\,321 \times 0,35 = 31\,262 \text{ чел.}$$

Возможное количество пораженных людей и структура их поражения в загородной зоне

$$N_{\text{зз}} = 96\,326 - 89\,321 = 7\,005 \text{ чел.},$$

из них:

$$\text{I степени (25 \%)} - 7\,005 \times 0,25 = 1\,751 \text{ чел.};$$

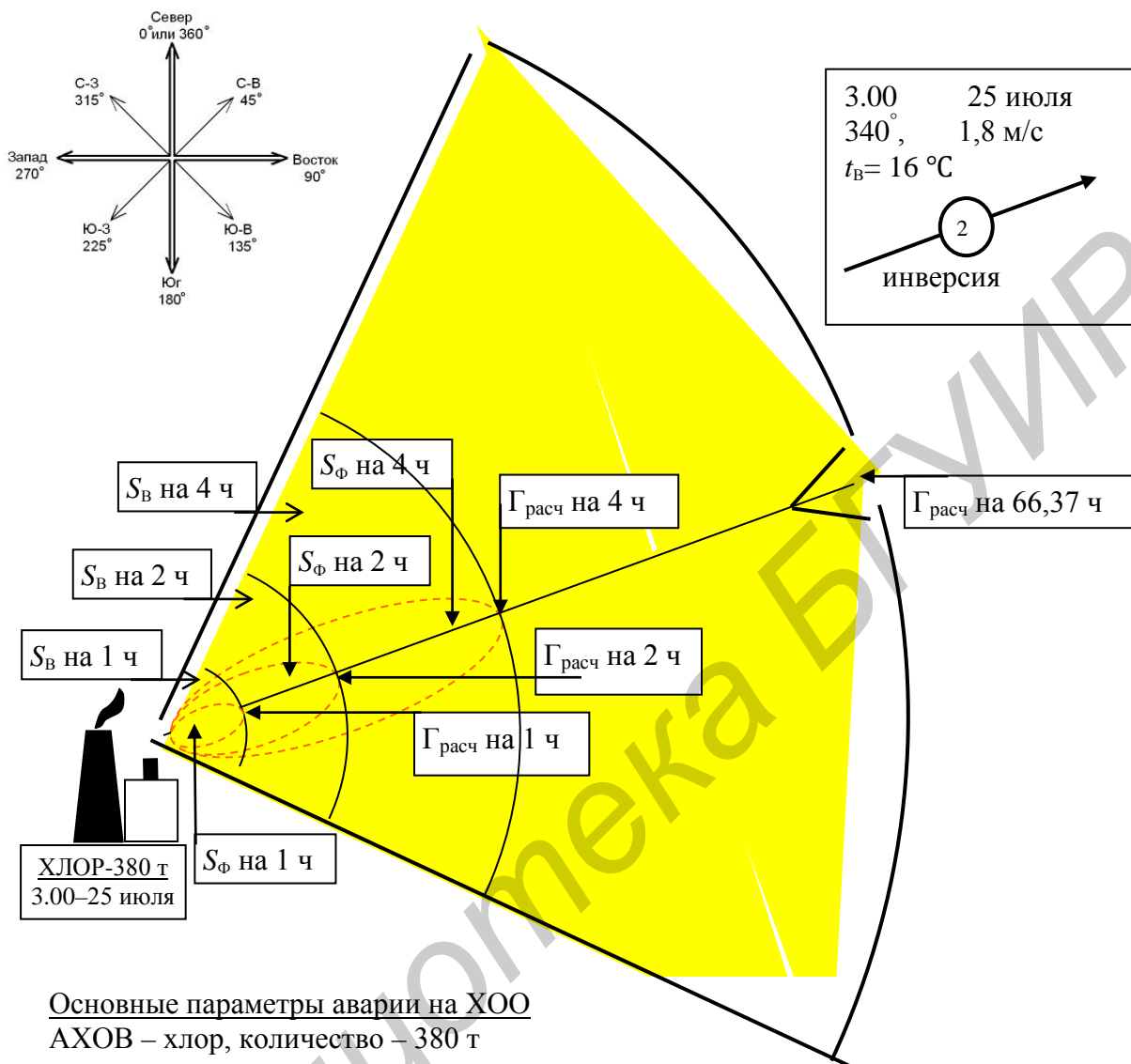
$$\text{II и III степени (40 \%)} - 7\,005 \times 0,4 = 2\,802 \text{ чел.};$$

$$\text{IV степени (35 \%)} - 7\,005 \times 0,35 = 2\,451 \text{ чел.}$$

Построим ситуационный план аварии, обозначим зоны заражения (рисунок 6.6).

Ситуационный план аварии

на ХОО (масштаб 1:75000)



Основные параметры аварии на ХОО

АХОВ – хлор, количество – 380 т

$t, \text{ч}$	$\Gamma_{\text{расч}}, \text{км}$	$S_{\text{В}}, \text{км}^2$	$S_{\text{Ф}}, \text{км}^2$
1	9	63,59	6,56
2	18	254,34	30,146
4	36	1017,36	138,514

Общее число пораженных 96 326 чел.,

из них:

I степени – 24 081 чел.,

II и III степени – 38 530 чел.,

IV степени – 33 714 чел.

Председатель КЧС объекта экономики

/ Иванов Н. С./

Начальник отдела ГОЧС объекта экономики студент группы 213501

Петров Сергей Игоревич

Рисунок 6.6 – Схема зон заражения

Задача для самостоятельной работы

Оценить обстановку при аварии на химически опасном объекте и построить ситуационный план аварии. Для это определить продолжительность действия химического источника заражения, глубину и площади зон возможного и фактического химического заражения на время после аварии (1, 2, 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. Ситуационный план должен быть выполнен с указанием границ зон возможного и фактического заражения. Исходные данные приведены в таблицах 6.1 и 6.8. Для расчета использовать АХОВ (сжиженное состояние), высота обваловки – 3 м. Дата, время аварии и метеоусловия – использовать реальные данные на момент расчета..

Таблица 6.8 – Исходные данные

Вариант	$t, \text{ т}$	$\Gamma_{\text{Г}}$, в долях от $\Gamma_{\text{расч}}$	ρ , чел./км ²	ρ' , чел./км ²	n_1 , %	n'_1 , %	n_2 , %	n'_2 , %	L, км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	320	0,7	3000	208	47	9	39	4	90
2	400	0,6	2800	192	46	8	38	3	80
3	340	0,8	2600	185	45	7	37	2	70
4	380	0,7	3000	208	47	9	39	4	60
5	360	0,6	2800	192	46	8	38	3	90
6	320	0,8	2600	185	45	7	37	2	80
7	400	0,7	3000	208	47	9	39	4	70
8	340	0,6	2800	192	46	8	38	3	60
9	380	0,8	2600	185	45	7	37	2	90
10	360	0,7	3000	208	47	9	39	4	80
11	320	0,6	2800	192	46	8	38	3	70
12	400	0,8	2600	185	45	7	37	2	60
13	340	0,7	3000	208	47	9	39	4	90
14	380	0,6	2800	192	46	8	38	3	80
15	360	0,8	2600	185	45	7	37	2	70
16	320	0,7	3000	208	47	9	39	4	60
17	400	0,6	2800	192	46	8	38	3	90
18	340	0,8	2600	185	45	7	37	2	80
19	380	0,7	3000	208	47	9	39	4	70
20	360	0,6	2800	192	46	8	38	3	60
21	320	0,8	2600	185	45	7	37	2	90
22	400	0,7	3000	208	47	9	39	4	80
23	340	0,6	2800	192	46	8	38	3	70
24	380	0,8	2600	185	45	7	37	2	60

Продолжение таблицы 6.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	360	0,7	3000	208	47	9	39	4	90
26	320	0,6	2800	192	46	8	38	3	80
27	400	0,8	2600	185	45	7	37	2	70
28	340	0,7	3000	208	47	9	39	4	60
29	380	0,6	2800	192	46	8	38	3	90
30	360	0,8	2600	185	45	7	37	2	80
31	320	0,7	3000	208	47	9	39	4	70

Содержание отчета

1 Титульный лист (см. приложение А). 2 Цель работы. 3 Исходные данные. 4 Теоретические сведения. 5 Ход выполнения работы. 6 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?
- 9 Что такое изотермия?
- 10 Что такое конвекция?
- 11 Какие различают особенности очагов химического поражения АХОВ?
- 12 В чем суть прогнозирования химической обстановки?
- 13 Что определяют по результатам оценки химической обстановки?

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(рекомендуемое)

Пример оформления титульного листа отчета

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра инженерной психологии и эргономики

Дисциплина: основы промышленной безопасности

ОТЧЕТ ПО РАБОТЕ №1
на тему
ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Выполнил

С. И. Петров
студент гр. 213501

Проверила

Н. В. Щербина
старший преподаватель кафедры

Оценка: _____

(подпись)

(дата)

Список литературы

1 Шишмарев, В. Ю. Надежность технических систем : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. Ю. Шишмарев. – М. : Издательский центр «Академия», 2010. – 304 с.

2 Корчагин, А. Б. Надежность технических систем и техногенный риск : учеб. пособие. В 2 ч. / А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. – Омск : ОмГТУ, 2011. – 140 с.

3 Надежность технических систем и техногенный риск / В. А. Акимов [и др.]. – М. : ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.

4 ТКП 474–2013. Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.

5 РД 52.04.253–90. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте.

6 Владимиров, В. А. Аварийно химически опасные вещества (АХОВ). Методика прогнозирования и оценки химической обстановки : учеб. пособие / В. А. Владимиров, В. С. Исаев. – М. : Военные знания, 2000. – 56 с.

Учебное издание

Щербина Наталья Витальевна
Осипович Виталий Семенович
Яшин Константин Дмитриевич

ОСНОВЫ ПРОМЫШЛЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Редактор *Е. С. Чайковская*

Корректор *Е. И. Герман*

Компьютерная правка, оригинал-макет *А. В. Бас*

Подписано в печать 07.06.2016. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 5,67. Уч.-изд. л. 6,0. Тираж 50 экз. Заказ 143.

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.

ЛП №02330/264 от 14.04.2014.

220013, Минск, П. Бровки, 6