

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ

В.В. Тютюник, О.М. Соболю, О.О. Тютюник, О.А. Ященко

# ПРИРОДНІ ТА ТЕХНОГЕННІ ЗАГРОЗИ

**Підручник**

Рекомендовано до друку і використання в освітньому процесі  
вченою радою НУЦЗ України

*Присвячується світлій пам'яті професора кафедри управління та організації діяльності  
у сфері цивільного захисту Олександра Миколайовича Соболя*

Харків 2023

Авторський колектив:

В.В. Тютюник, доктор технічних наук, професор  
**О.М. Соболю**, доктор технічних наук, професор  
О.О. Тютюник, кандидат технічних наук, доцент  
О.А. Ященко, кандидат економічних наук, доцент

**Рецензенти:** доктор фізико-математичних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України **Л. Ф. Черногор**, професор кафедри космічної радіофізики Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна; кандидат технічних наук, старший науковий співробітник **С. Ю. Огурцов**, начальник кафедри організації заходів цивільного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту; кандидат технічних наук, доцент **М. М. Удянський**, начальник факультету цивільного захисту НУЦЗ України.

Рекомендовано до друку і використання в освітньому процесі  
вченою радою НУЦЗ України  
(протокол від 25.11.2021 № 3)

**Тютюник В. В., Соболю О. М., Тютюник О. О., Ященко О. А.**  
П 77 Природні та техногенні загрози: підручник / В. В. Тютюник, О. М. Соболю, О.  
О. Тютюник, О. А. Ященко. – Х.: Друкарня Мадрид. – 2023. – 480 с.

ISBN 978-617-8254-18-6

У підручнику викладено теоретичні основи прогнозування надзвичайних ситуацій, методи прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру, основи теорії надійності та показники надійності технічних систем та основи теорії техногенного ризику. Матеріал підручника викладено відповідно до робочої програми навчальної дисципліни «Природні та техногенні загрози».

Підручник призначений для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за спеціальністю 263 «Цивільна безпека» за освітньо-професійними програмами «Цивільний захист», «Інженерне забезпечення саперних, піротехнічних та вибухових робіт», «Охорона праці» тощо.

Підручник також може бути корисним для практичних працівників Державної служби України з надзвичайних ситуацій та для фахівців у галузі національної безпеки (цивільного захисту, пожежної безпеки, охорони праці, екологічної безпеки тощо)

Іл. 103. Табл. 63. Бібліогр.: 66 назв.

ISBN 978-617-8254-18-6

УДК 504:614.8(477)(075.8)  
© Тютюник В. В., Соболю О. М.,  
Тютюник О. О., Ященко О. А., 2023  
© ТОВ «Друкарня Мадрид», 2023

## Зміст

Вступ.....	7
1.1 Надзвичайна ситуація: основні терміни та поняття.....	10
1.2 Огляд існуючих загроз природного характеру.....	15
1.3 Огляд сучасних надзвичайних ситуацій техногенного характеру.....	37
Контрольні питання та завдання.....	52
Глава 2. Теоретичні основи прогнозування надзвичайних ситуацій.....	54
2.1 Основи прогнозування. Загальні положення.....	54
2.2 Методи прогнозування та їх класифікація.....	58
2.2.1 Формалізовані методи прогнозування.....	59
2.2.2 Інтуїтивні методи прогнозування.....	63
2.2.3 Ряди динаміки.....	65
2.2.4 Метод найменших квадратів.....	70
2.3 Кореляційно-регресійний аналіз.....	77
2.3.1 Рівняння регресійної моделі.....	80
2.3.2 Парний регресійний аналіз.....	81
2.3.3 Коефіцієнт кореляції.....	86
2.3.4 Множинний регресійний аналіз.....	91
2.4 Теоретичні основи прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій.....	95
2.4.1 Моделі впливу вражаючих факторів надзвичайних ситуацій.....	96
2.4.2 Закони руйнування споруд і ураження людей.....	98
2.4.3 Математичне очікування об'ємів руйнувань і уражень людей.....	102
Контрольні питання та завдання.....	108
Глава 3. Прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій природного характеру.....	110
3.1 Методика прогнозування паводкової повені.....	110
3.2 Інженерна обстановка в разі катастрофічного затоплення внаслідок руйнування гідротехнічних споруд.....	126
3.3 Прогнозування процесу руху і трансформації селевого потоку.....	131
3.4 Обстановка в районах руйнівних землетрусів.....	139
Контрольні питання та завдання.....	148
Глава 4. Прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру.....	150
4.1 Завали, що утворюються при руйнуванні будівель у зонах ураження.....	150
4.1.1 Розрахункові схеми завалів.....	150
4.1.2 Дальність розльоту уламків.....	151
4.1.3 Висота завалів.....	154
4.1.4 Структура і об'ємно-масові характеристики завалів.....	157
4.1.5 Показники уламків.....	159

4.2	Обстановка при виробничих аваріях із вибухом.....	161
4.2.1	Вибух газоповітряних сумішей у відкритому просторі .....	162
4.2.2	Вибухи газоповітряних і пилоповітряних сумішей у виробничих приміщеннях.....	167
4.2.2.1	Вибухи газопароповітряних сумішей .....	167
4.2.2.2	Вибухи пилоповітряних сумішей.....	169
4.2.3	Прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті.....	171
4.2.4	Вибухи у випадку аварійної розгерметизації магістрального газопроводу .....	188
4.2.5	Вибух конденсованих вибухових речовин .....	191
4.2.6	Прогнозування обстановки при аваріях із вибухом на пожежовибухонебезпечних об'єктах .....	192
4.2.7	Показники інженерної обстановки при виробничих аваріях із вибухом.....	192
4.3	Прогнозування об'ємів і термінів виконання інженерно-технічних заходів під час ліквідації наслідків аварій на атомних електричних станціях .....	198
4.3.1	Методика прогнозування об'ємів робіт з очищення території промислового майданчика атомної електричної станції від радіоактивно забруднених уламків і ґрунту .....	198
4.3.2	Поховання радіоактивно забруднених уламків та ґрунту в заглиблених могильниках.....	201
4.3.3	Водозахисні заходи на водостоках при аваріях на атомних електричних станціях.....	202
4.3.4	Прогнозування об'ємів і термінів виконання інженерно-технічних заходів щодо консервації радіоактивно забруднених ділянок лісу при аварії на атомній електричній станції.....	204
	Контрольні питання та завдання.....	208
	Глава 5. Основи теорії надійності. Основні характеристики надійності невідновлюваних об'єктів .....	209
5.1	Основні поняття теорії надійності. Класифікація відмов. Складові надійності.....	209
5.1.1	Історичний огляд розвитку теорії надійності.....	210
5.1.2	Основні поняття теорії надійності.....	211
5.1.3	Класифікація і характеристики відмов .....	212
5.1.4	Складові надійності.....	214
5.1.5	Основні показники надійності .....	214
5.1.6	Математичні основи теорії надійності.....	215
5.1.6.1	Основи теорії множин .....	215
5.1.6.2	Основи теорії ймовірностей.....	217
5.2	Показники надійності невідновлюваних об'єктів.....	219
5.2.1	Ймовірність безвідмовної роботи.....	220

5.2.2 Щільність розподілу відмов .....	222
5.2.3 Інтенсивність відмов .....	224
5.3 Рівняння зв'язку показників надійності. Чисельні характеристики безвідмовності невідновлюваних об'єктів .....	226
5.3.1 Рівняння зв'язку показників надійності .....	226
5.3.2 Чисельні характеристики безвідмовності невідновлюваних об'єктів.....	227
5.4 Математичні моделі теорії надійності. Нормальний закон розподілу наробітку до відмови .....	231
5.4.1 Загальні поняття про моделі надійності.....	231
5.4.2 Класичний нормальний розподіл наробітку до відмови .....	232
5.4.3 Усічений нормальний розподіл.....	238
5.5 Закони розподілу наробітку до відмови .....	242
5.5.1 Експоненційний розподіл наробітку до відмови.....	242
5.5.2 Логарифмічно нормальний розподіл наробітку до відмови .....	245
5.5.3 Гамма-розподіл наробітку до відмови.....	246
5.5.4 Розподіл Релея наробітку до відмови .....	248
5.6 Визначення показників надійності за допомогою статистичної обробки результатів випробувань .....	248
5.6.1 Формування статистичного ряду .....	249
5.6.2 Розрахунок емпіричних функцій .....	250
5.6.3 Розрахунок статистичних оцінок числових характеристик надійності .....	253
5.6.4 Вибір закону розподілу випадкової величини наробітку до відмови.....	254
5.6.5 Розрахунок критерію згоди .....	255
Контрольні питання та завдання .....	256
Глава 6. Розрахунок показників надійності технічних систем.....	258
6.1 Надійність технічних систем. Загальні поняття та визначення. Надійність основної системи .....	258
6.1.1 Основи розрахунку надійності систем. Загальні поняття .....	258
6.1.2 Системи з резервуванням. Загальні поняття.....	260
6.1.3 Надійність основної системи.....	263
6.2 Надійність систем з навантаженим резервуванням .....	266
6.2.1 Визначення показників надійності системи з навантаженим резервуванням .....	266
6.2.2 Надійність систем з обмеженням по навантаженню .....	269
6.2.3 Залежність надійності системи від кратності резервування .....	269
6.3 Надійність систем з ненавантаженим резервуванням .....	272
6.3.1 Розрахунок показників надійності для систем з ненавантаженим резервуванням .....	272
6.3.2 Вплив кратності резервування на надійність системи з ненавантаженим резервуванням .....	277
6.4 Надійність систем з полегшеним та ковзним резервом.....	278

6.4.1 Надійність систем з полегшеним резервом .....	278
6.4.2 Надійність систем з ковзним резервом .....	282
6.5 Схеми для розрахунку показників надійності технічних систем .....	287
6.5.1 Метод спрощення схеми (мережі) .....	287
6.5.2 Метод перетворення з'єднання трикутником у з'єднання зіркою.....	289
6.5.3 Мостова схема .....	291
6.6 Надійність відновлюваних об'єктів і систем.....	292
6.6.1 Математична модель надійності відновлюваних об'єктів і систем .....	292
6.6.2 Показники надійності відновлюваних систем .....	296
Контрольні питання та завдання до шостого розділу.....	298
Глава 7. Основи теорії техногенного ризику .....	300
7.1 Поняття техногенного ризику .....	300
7.1.1 Концепції ризику .....	301
7.1.2 Показники техногенного ризику .....	303
7.2 Існуючі підходи до нормування ризиків в Україні .....	307
7.3 Загальна процедура побудови і оцінки дерева несправностей.....	317
7.3.1 Визначення меж системи.....	318
7.3.2 Побудова дерева несправностей.....	318
7.3.3 Якісна оцінка дерева несправностей.....	321
7.3.4 Кількісна оцінка дерева несправностей.....	321
7.4 Дерево несправностей з подіями, що повторюються. Алгоритм знаходження мінімальних перерізів .....	322
7.4.1 Алгоритм знаходження мінімальних перерізів.....	324
7.4.2 Подвійність дерева несправностей.....	327
7.5 Ймовірнісна оцінка дерева несправностей .....	328
7.5.1 Схема АБО .....	328
7.5.2 Схема ТА .....	329
7.6 Оцінка інтенсивності відмов за деревом несправностей .....	329
7.6.1 Схема АБО .....	330
7.6.2 Схема ТА .....	330
7.7 Основи управління ризиком.....	331
7.7.1 Необхідність та можливість управління ризиками у соціотехноприродних системах.....	331
7.7.2 Структура, рівні та механізми управління ризиками .....	332
7.7.3 Процес управління ризиками .....	335
Контрольні питання та завдання.....	338
Додатки.....	340
Список використаних джерел.....	476

## ВСТУП

В умовах нерівномірного розподілу джерел небезпек по території України кожній точці простору притаманні свої рівні природного, техногенного, соціального та воєнного навантажень, які впливають на склад сил та тактико-технічні характеристики засобів функціонуючої геоінформаційної системи безпеки, а саме системи національної безпеки.

В державі для забезпечення реалізації державної політики у сфері цивільного захисту як складової системи національної безпеки щодо захисту населення, територій, навколишнього природного середовища та майна від надзвичайних ситуацій (НС) шляхом запобігання таким ситуаціям, ліквідації їх наслідків і надання допомоги постраждалим у мирний час та в особливий період, функціонує єдина державна система цивільного захисту.

Основу створення єдиної державної системи цивільного захисту має складати класичний контур управління (рис. В.1), який забезпечить: 1) збір, обробку та аналіз інформації; 2) моделювання розвитку обстановки на об'єкті управління та розвитку НС на території міста, регіону, держави; 3) розробку та ухвалення управлінських рішень щодо попередження та ліквідації НС, а також мінімізації їх наслідків; 4) виконання рішень щодо попередження та ліквідації НС, а також мінімізації їх наслідків.

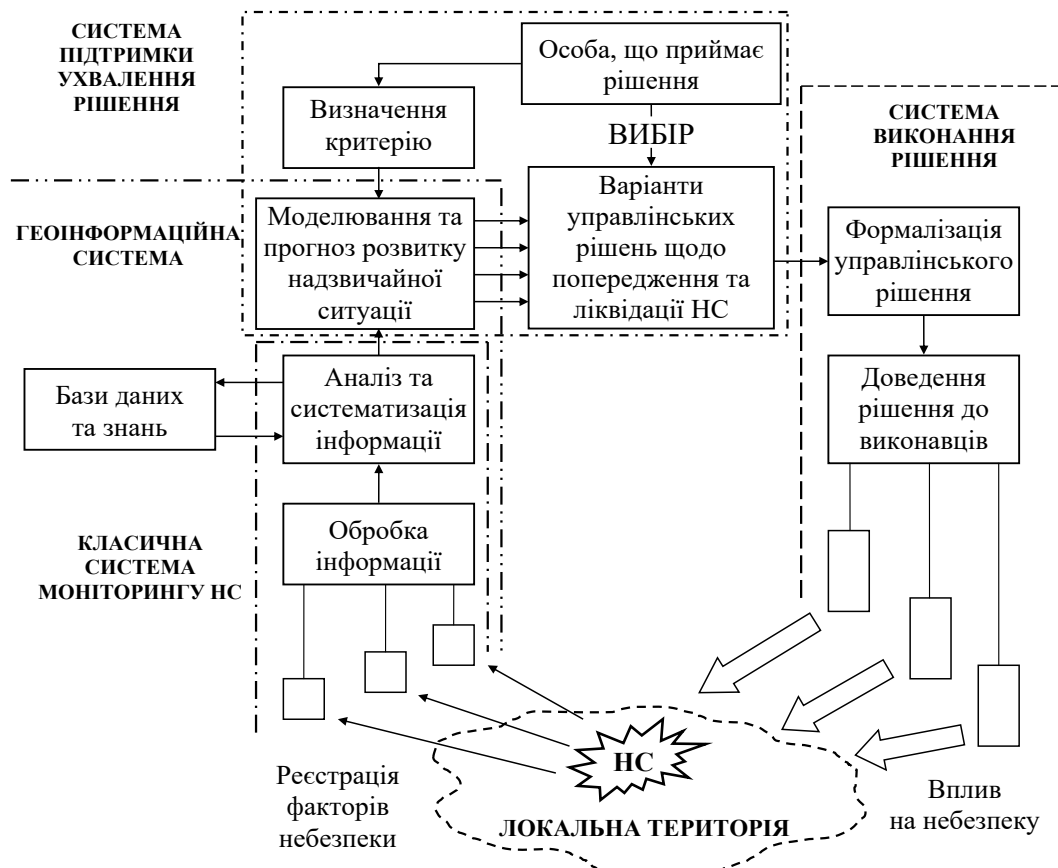


Рисунок В.1 – Схема структури системи цивільного захисту як засобу управління

Перший рівень – це пристрої реєстрації факторів небезпеки. Вони призначені для контролю окремих або відразу декількох параметрів об'єкта управління (наприклад, температури, вологості, тиску, напрямку та швидкості руху повітря, якісно-кількісного складу атмосфери, руху небезпечних вантажів тощо) та рознесені у просторі по горизонталі (у точках із різними географічними координатами) й по вертикалі (встановлені на певних висотах або глибинах).

При цьому отримана засобами контролю первинна інформація про фактори небезпеки на об'єкті управління по кабелях або радіоканалу транслюється до пристроїв другого рівня, призначених виконувати обробку отриманої інформації та представляти її у вигляді, необхідному для третього рівня. Обробка отриманої інформації може виконуватися як в одному місці, так і на декількох, залежно від конкретної системи моніторингу та розмірів контролюваного системою моніторингу об'єкта управління. Оброблена інформація у відповідному вигляді потрапляє до третього рівня, де виконується аналіз отриманої інформації та систематизація даних, на основі якої робиться висновок про стан небезпеки об'єкта управління.

Використання автоматизованих засобів обробки інформації дозволяє прискорити процеси на другому і третьому рівнях системи моніторингу, а також створити електронні, доступні в реальному масштабі часу, бази даних та знань.

Розробка спеціального програмного забезпечення та навчання персоналу з метою досягнення цих цілей дозволяє на основі отриманої інформації виконувати моделювання небезпечної ситуації та здійснювати прогнозування її розвитку рівня НС, при цьому графічно (у тому числі у вигляді електронних карт) відображати прогнозовану динаміку катастрофічних подій. Структуру з чотирьох рівнів прийнято називати *геоінформаційною системою*.

Інша інформаційна система, яка, як показано на рис. В.1, перетинається з геоінформаційною системою, є *системою підтримки ухвалення рішення*. Тут особа, що приймає рішення, визначає один або декілька критеріїв, відповідно до яких здійснюється прогностичне моделювання розвитку НС та виробляються варіанти управлінських рішень, які обґрунтовані відповідними розрахунками.

Отримавши набір варіантів управлінських рішень, особа, що приймає рішення, обирає один з них або задає ще додаткові критерії, відповідно до яких виконується моделювання та розробка управлінських рішень, спрямованих на недопущення розвитку небезпеки до рівня катастрофи, або, якщо катастрофи вже не уникнути, то виконується розробка управлінських рішень, спрямованих на мінімізацію наслідків від неї.

Затверджене вказаною вище особою рішення потрапляє до системи виконання рішення, де виконується його формалізація та доведення до виконавців, які, у свою чергу, впливають на джерела небезпеки, які виникли на об'єкті управління. Зміни стану об'єкта управління та зміни стану небезпеки на ньому викликатимуть зміни у величинах вимірюваних параметрів, що фіксуються пристроями контролю. Надалі ці зміни будуть відпрацьовані, а пода-



льше моделювання покаже ефективність виконання управлінського рішення – контур управління замкнувся.

Ефективність функціонування єдиної державної системи цивільного захисту в багатьох випадках залежить від забезпечення відповідного рівня адекватності моделювання та достовірності прогнозування розвитку небезпечної ситуації, а також ухвалення оптимальних управлінських антикризових рішень, спрямованих на попередження та ліквідацію НС, а також мінімізацію їх наслідків по території України.

Для цього представлений підручник дає майбутнім фахівцям у галузі цивільного захисту основи теоретичних знань та практичних навичок щодо прогнозування НС природного та техногенного характеру. У підручнику викладено методи прогнозування наслідків НС природного та техногенного характеру, а також основи теорії надійності та показники надійності технічних систем, основи теорії техногенного ризику.

Матеріал підручника викладено відповідно до робочої програми навчальної дисципліни «Природні та техногенні загрози».

Підручник призначений для здобувачів вищої освіти закладів вищої освіти III і IV рівнів акредитації, які навчаються на першому (бакалаврському) рівні за спеціальністю 263 «Цивільний захист» за освітньо-професійними програмами: «Цивільний захист», «Інженерне забезпечення саперних, піротехнічних та вибухових робіт» та «Охорона праці».

Підручник також може бути корисним для практичних працівників Державної служби України з надзвичайних ситуацій та для фахівців у галузі національної безпеки (цивільного захисту, пожежної безпеки, охорони праці, екологічної безпеки тощо).

# ГЛАВА 1. ОГЛЯД НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ТА ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

## 1.1 Надзвичайна ситуація: основні терміни та поняття

Кабінетом Міністрів України, центральними і місцевими органами виконавчої влади, органами місцевого самоврядування, підприємствами, установами і організаціями шляхом проведення відповідних заходів цивільного захисту забезпечується конституційне право громадян України на захист життя і здоров'я.

Завдання та основні напрями роботи у сфері природної та техногенної безпеки і цивільного захисту населення та територій від НС у цілому визначались актами законодавства, іншими нормативно-правовими документами з питань цивільного захисту, промислової безпеки та охорони праці, охорони навколишнього природного середовища, охорони здоров'я.

Верховною Радою України був прийнятий Кодекс цивільного захисту України (1 липня 2013 року).

Об'єкти господарювання та територія України перебувають під значним негативним впливом уражаючих чинників природного та техногенного походження, що призводили до виникнення НС і небезпечних подій, загибелі людей на виробництві та в побуті, погіршення умов життєдіяльності населення, забруднення навколишнього природного середовища, економічних збитків.

Розглянемо основні поняття:

**Надзвичайна ситуація** – обстановка на окремій території чи суб'єкті господарювання на ній або водному об'єкті, яка характеризується порушенням нормальних умов життєдіяльності населення, спричинена катастрофою, аварією, пожежею, стихійним лихом, епідемією, епізоотією, епіфітотією, застосуванням засобів ураження або іншою небезпечною подією, що призвела (може призвести) до виникнення загрози життю або здоров'ю населення, великої кількості загиблих і постраждалих, завдання значних матеріальних збитків, а також до неможливості проживання населення на такій території чи об'єкті, провадження на ній господарської діяльності.

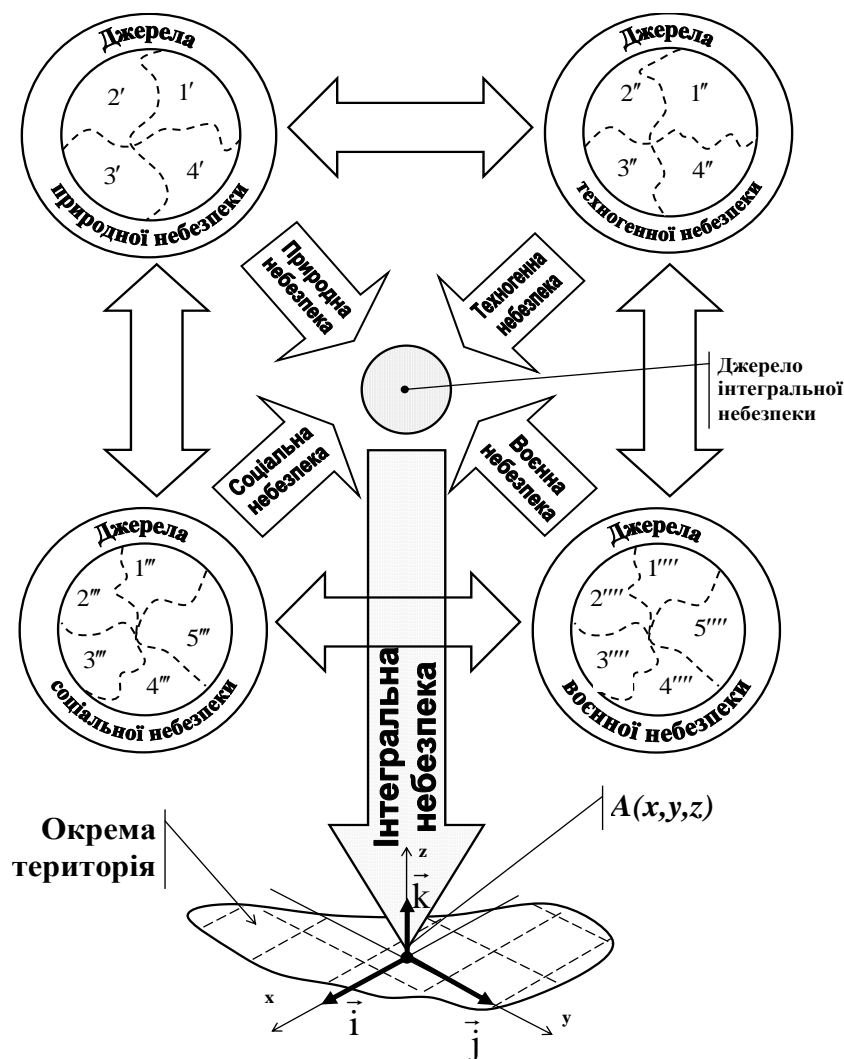
Основними причинами виникнення НС в Україні є:

- надзвичайне техногенне навантаження території;
- значний моральний та фізичний знос основних виробничих фондів більшості підприємств України;
- погіршення матеріально-технічного забезпечення, зниження виробничої й технологічної дисципліни;
- незадовільний стан збереження, утилізації та захоронення високотоксичних, радіоактивних та побутових відходів;
- ігнорування економічних факторів, вимог, стандартів;
- недостатня увага керівників відповідних органів державного управління до проведення комплексу заходів, спрямованих на запобігання НС природного і техногенного характеру та зниження їх наслідків;

- відсутність сучасних систем управління небезпечними процесами;
- низька професійна підготовка персоналу та населення до дій в екстремальних умовах;
- дефіцит кваліфікованих кадрів;
- низький рівень застосування прогресивних ресурсозберігаючих і екологобезпечних технологій.

*Небезпечна подія* – подія, у тому числі катастрофа, аварія, пожежа, стихійне лихо, епідемія, епізоотія, епіфітотія, яка за своїми наслідками становить загрозу життю або здоров'ю населення чи призводить до завдання матеріальних збитків.

У системі цивільного захисту існують такі загрози для території та населення України, які подано схематично на рис. 1.1



**Рисунок 1.1** – Модельне представлення процесів зародження на окремій території України джерел надзвичайних ситуацій різного походження

Наведене на рис. 1.1 джерело інтегральної безпеки в точці  $A(x, y, z)$  окремої території України нелінійно об'єднує джерела природної безпеки: 1' – процеси в атмосфері; 2' – процеси у біосфері; 3' – процеси у літосфері;

4' – процеси у гідросфері; джерела техногенної небезпеки: 1'' – аварії на промислових об'єктах і транспорті; 2'' – вибухи; 3'' – пожежі; 4'' – вивільнення інших видів енергії; джерела соціальної небезпеки: 1''' – психологічні особливості особи та особливості виховання; 2''' – несприятливе положення особи; 3''' – соціальна несправедливість; 4''' – напруженість у міжгрупових, міжконфесійних і міжнаціональних стосунках; 5''' – негативні соціальні процеси, що призводять до руйнування етичних засад, соціальної стійкості особи та законслухняності; джерела воєнної небезпеки: 1'''' – наявність гострих суперечностей, розв'язання яких є можливим лише із застосуванням воєнної сили; 2'''' – наявність у однієї із сторін достатньої кількості військових сил і засобів для розв'язання суперечності на свою користь або здатність держави створити такі сили в перспективі; 3'''' – наявність у лідерів або урядів політичної волі або рішучості піти на застосування сили, здатності використовувати збройні сили для вирішення можливого конфлікту; 4'''' – наявність надійних союзників серед держав, їх коаліцій або інших суб'єктів військово-політичних відносин; 5'''' – сприятливі геополітичні умови та реальна (або прогнозована) військово-політична обстановка для здійснення військових акцій.

*Зона НС* – окрема територія, акваторія, де сталася НС.

*Аварія* – небезпечна подія техногенного характеру, що спричинила ураження, травмування населення або створює на окремій території чи території суб'єкта господарювання загрозу життю або здоров'ю населення та призводить до руйнування будівель, споруд, обладнання і транспортних засобів, порушення виробничого або транспортного процесу чи спричиняє наднормативні, аварійні викиди забруднюючих речовин та інший шкідливий вплив на навколишнє природне середовище.

*Дорожньо-транспортна пригода* – подія, що сталася під час руху дорожнього транспортного засобу, внаслідок якої загинули або зазнали травм люди чи заподіяна шкода майну.

*Епідемія* – масове поширення інфекційної хвороби серед населення відповідної території за короткий проміжок часу.

*Епізоотія* – широке поширення заразної хвороби тварин за короткий проміжок часу, що значно перевищує звичайний рівень захворюваності на цю хворобу на відповідній території.

*Епіфітотія* – широке поширення на території однієї або кількох адміністративно-територіальних одиниць заразної хвороби рослин, що значно перевищує звичайний рівень захворюваності на цю хворобу на відповідній території.

*Катастрофа* – велика за масштабами аварія чи інша подія, що призводить до тяжких наслідків.

*Пожежа* – неконтрольований процес знищування або пошкодження вогнем майна, під час якого виникають чинники, небезпечні для істот та навколишнього природного середовища.

*Стихийне лихо* – природне явище, що діє з великою руйнівною силою, заподіює значну шкоду території, на якій відбувається, порушує нормальну життєдіяльність населення, завдає матеріальних збитків.

*Небезпечний чинник* – складова частина небезпечного явища (пожежа, вибух, викидання, загроза викидання небезпечних хімічних, радіоактивних і біологічно небезпечних речовин) або процесу, що характеризується фізичною, хімічною, біологічною чи іншою дією (впливом), перевищенням нормативних показників і створює загрозу життю та/або здоров'ю людини.

*Зона можливого ураження* – окрема територія, акваторія, на якій внаслідок настання НС виникає загроза життю або здоров'ю людей та заподіяна шкода майну.

*Постраждалі внаслідок НС техногенного або природного характеру* – особи, здоров'ю яких заподіяна шкода внаслідок НС.

*Класифікація НС* – система, згідно з якою НС поділяються на класи і підкласи залежно від характеру їх походження.

*Класифікаційна ознака НС* – технічна або інша характеристика небезпечної події, що зумовлює виникнення обстановки, яка визначається як НС.

*Порогове значення класифікаційної ознаки НС* – визначене в установленому порядку значення технічної або іншої характеристики конкретної аварійної ситуації, перевищення якого відносить ситуацію до рангу надзвичайних і потребує відповідного рівня реагування.

Класифікація НС впроваджена в Україні з метою забезпечення організаційної взаємодії центральних і місцевих органів виконавчої влади, підприємств, установ та організацій у процесі вирішення питань, пов'язаних із НС, ліквідацією їх наслідків та веденням державної статистики.

Класифікація здійснюється на підставі «Порядку класифікації надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру за їх рівнями», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 березня 2004 року № 368, Державного класифікатора надзвичайних ситуацій ДК 019-2010 та «Класифікаційних ознак надзвичайних ситуацій», затверджених наказом МВС України № 658 від 06.08.2018.

Залежно від причин походження подій, що зумовили або можуть зумовити виникнення НС на території України, розрізняють НС техногенного, природного, соціального та воєнного характеру, а в залежності від обсягів заподіяних наслідків, технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, НС класифікуються як НС державного, регіонального, місцевого та об'єктового рівня.

На рис. 1.2 схематично показано алгоритм класифікації НС.

Алгоритм складається з трьох етапів: віднесення події за пороговим значенням до НС; класифікація НС за походженням; класифікація НС за рівнем.

При цьому враховується характер походження НС, ступінь поширення її небезпечних факторів та розмір людських втрат і матеріальних збитків.

Слід зазначити, що об'єктами класифікації можуть бути лише НС, які поділяються на НС техногенного, природного, соціального та воєнного характеру.

*Надзвичайна ситуація техногенного характеру* – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті унаслідок транспортної аварії (катастрофи), пожежі, вибу-

ху, аварії з викиданням (загрозою викидання) небезпечних хімічних, радіоактивних і біологічно небезпечних речовин, раптового руйнування споруд; аварії в електроенергетичних системах, системах життєзабезпечення, системах телекомунікацій, на очисних спорудах, у системах нафтогазового промислового комплексу, гідродинамічні аварії тощо.

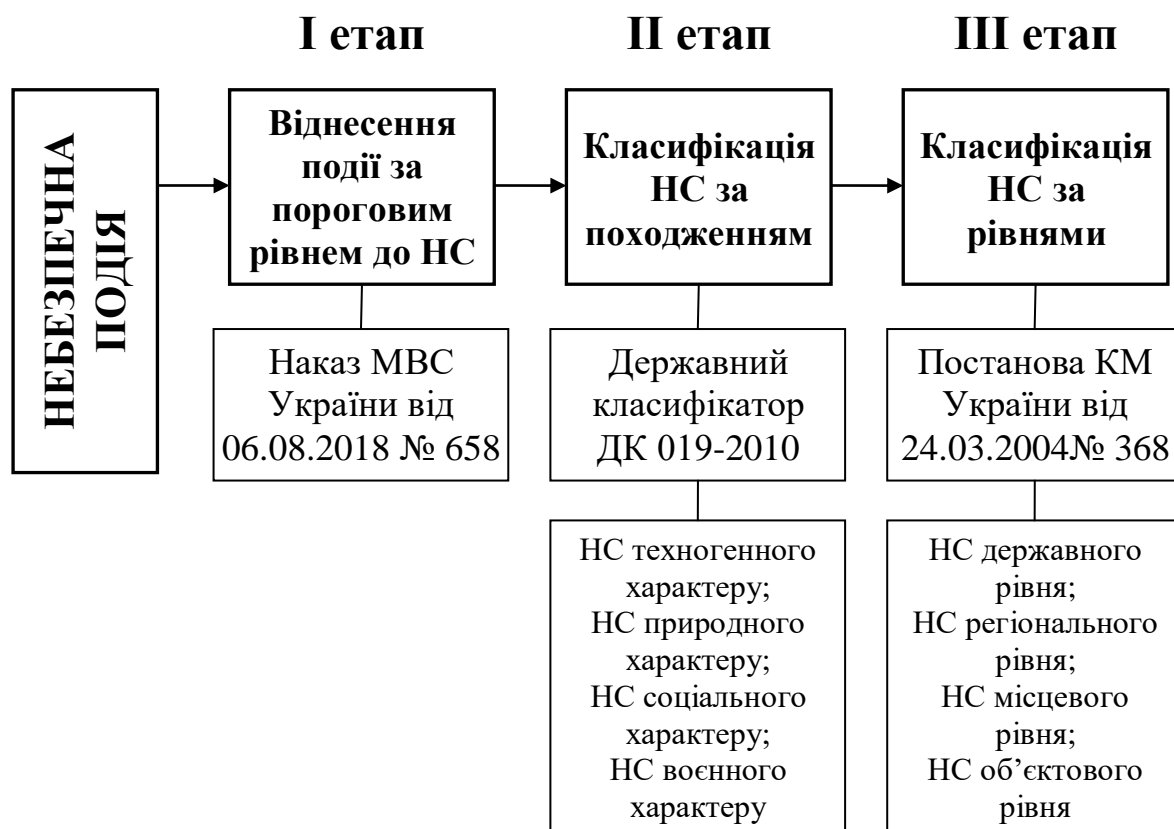


Рисунок 1.2 – Алгоритм класифікації надзвичайної ситуації

*Надзвичайна ситуація природного характеру* – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, пов'язане з небезпечним геофізичним, геологічним, метеорологічним або гідрологічним явищем, деградацією ґрунтів чи надр, пожежею у природних екологічних системах, зміною стану повітряного басейну, інфекційною захворюваністю та отруєнням людей, інфекційним захворюванням свійських тварин, масовою загибеллю диких тварин, ураженням сільськогосподарських рослин хворобами та шкідниками тощо.

*Надзвичайна ситуація соціального характеру* – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, спричинене протиправними діями терористичного і антиконституційного спрямування, або пов'язане зі зникненням (викраденням) зброї та небезпечних речовин, нещасними випадками з людьми тощо.

*Надзвичайна ситуація воєнного характеру* – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об’єкті на ній або на водному об’єкті, спричинене застосуванням звичайної зброї або зброї масового ураження, під час якого виникають вторинні чинники ураження населення, що її визначають в окремих нормативних документах.

Основним документом, згідно з яким здійснюється державне регулювання захисту населення та територій від НС, є Кодекс цивільного захисту України. Він регулює відносини, пов’язані із: комплексом заходів, які реалізуються на території України в мирний час та в особливий період і спрямовані на захист населення, територій, навколишнього природного середовища, майна, матеріальних і культурних цінностей від НС та інших небезпечних подій, запобігання виникненню таких ситуацій та подій, ліквідацію їх наслідків, надання допомоги постраждалим, здійснення державного нагляду (контролю) у сфері пожежної та техногенної безпеки; функціонуванням єдиної державної системи цивільного захисту; визначенням повноважень суб’єктів забезпечення цивільного захисту.

## **1.2 Огляд існуючих загроз природного характеру**

На поверхні Землі та у прилеглих до неї шарах атмосфери, літосфери, гідросфери і космосфери протікає безліч процесів різної природи. Результати цих процесів і взаємної трансформації можуть служити причинами виникнення небезпечних для території земної кулі природних явищ, таких як землетруси, цунамі, виверження вулканів, повені, урагани тощо.

Збільшення за останнє десятиліття розвитку цивілізації кількості й руйнівної сили НС природного характеру призводить до порушень нормальних умов життєдіяльності суспільства, що характеризуються значними соціально-економічними наслідками. Так, землетруси, повені, зсуви, селеві потоки, бурі, урагани, снігові заноси, лісові пожежі лише протягом останніх 20 років забрали життя більше трьох мільйонів чоловік. За даними ООН, за цей період майже один мільярд жителів нашої планети зазнав збитків від стихійних лих.

Серед надзвичайних ситуацій природного походження на Україні найчастіше трапляються:

- геологічні небезпечні явища (зсуви, обвали та осипи, просадки земної поверхні);
- метеорологічні небезпечні явища (зливи, урагани, сильні снігопади, сильний град, ожеледь);
- гідрологічні небезпечні явища (повені, паводки, підвищення рівня ґрунтових вод та ін.);
- природні пожежі лісових та хлібних масивів;
- масові інфекції та хвороби людей, тварин і рослин.

Особливості географічного положення України, атмосферні процеси, наявність гірських масивів, підвищень, близькість теплих морів зумовлюють різноманітність кліматичних умов: від надлишкового зволоження в західному

Поліссі – до посушливого – в південній степовій зоні. Виняткові кліматичні умови мають місце на Південному березі Криму, в горах Українських Карпат та Криму. Внаслідок взаємодії всіх цих факторів виникають небезпечні стихійні явища. В окремих випадках вони мають катастрофічний характер.

Надзвичайні ситуації природного походження в Україні поділяються на: геологічні, географічні, метеорологічні, агрометеорологічні, морські гідрологічні, гідрологічні небезпечні явища, природні пожежі, епідемії, епізоотії, епіфітотії.

Стихійні явища часто виникають у комплексі, що значно посилює їх негативний вплив. Небезпечні природні явища переважно визначаються трьома основними групами процесів – ендогенними, екзогенними та гідрометеорологічними.

Стихійні лиха, що мають місце на території України, можна поділити на *прості*, що включають один елемент (наприклад, сильний вітер, зсув або землетрус), та *складні*, що включають декілька процесів однієї групи або кількох груп, наприклад, негативних атмосферних та геодинамічних екзогенних процесів, ендогенних, екзогенних та гідрометеорологічних процесів у поєднанні з техногенними.

#### *Геологічно небезпечні явища*

*Землетруси (earthquakes)* – коливання земної кори, що виникають внаслідок вибухів у глибині землі, розламів шарів земної кори, активної вулканічної діяльності. Область підземного удару викликає пружні коливання (сейсмічні хвилі), що поширюються по землі у всіх напрямках. Область землі, з якої виходять хвилі землетрусу, називають *центром*, а розташовану на поверхні землі ділянку – *епіцентром землетрусу*.

Інтенсивність землетрусу вимірюється в балах за шкалою Ріхтера, а в останні роки у нашій країні та у ряді європейських держав використовують 12-бальну міжнародну шкалу MSK-64. Інтенсивність землетрусу зменшується до периферії зони катастрофи. Осередки землетрусів знаходяться на глибині 30–60 км, а інколи – на глибині до 700 км. В залежності від причин і місця виникнення землетрусу поділяються на тектонічні, вулканічні, обвальні та моретруси.

Землетруси захоплюють великі території та характеризуються: руйнуванням будівель і споруд, під уламки яких потрапляють люди, виникненням масових пожеж і виробничих аварій; затопленням населених пунктів і цілих районів; отруєнням газами у випадку вулканічних вивержень; ураженням людей і руйнуванням будівель уламками вулканічних гірських порід; ураженням людей і виникненням осередків пожеж у населених пунктах від вулканічної лави; провалом населених пунктів у випадках виникнення обвальних землетрусів; руйнуванням і змиванням населених пунктів хвилями цунамі; негативною психологічною дією.

Сейсмоактивні зони оточують Україну на південному заході й півдні: Закарпатська, Вранча, Кримсько-Чорноморська та Південно-Азовська.



# Ймовірність землетрусів у Україні

Значна частина території України належить до сейсмічно небезпечної зони, однак найуразливішими є Закарпаття, Буковина, Крим і Одеська область.

## Сейсмічне районування території України



### Найсильніші землетруси за останні 100 років

#### 1 Масив Вранча

**1940** 10 листопада

⊕ **7,4 бала**

⊙ Одеса, Ізмаїл (7), Чернівці, Миколаїв (6), Львів, Київ, Дніпропетровськ (5)

**1977** 4 березня

⊕ **7,5 бала**

⊙ Рені, Ізмаїл (7), Одеса (6), Чернівці, Умань, Херсон (5), Київ (4)

**1986** 30 серпня

⊕ **7,2 бала**

⊙ Одеса (6), Кіровоград, Миколаїв (5), Чернігів, Полтава, Запоріжжя (4)

**1990** 30—31 травня

⊕ **6,9 бала**

⊙ Вінниця, Житомир, Миколаїв (5), Тернопіль, Луцьк, Чернігів, Харків, Ялта (4)

#### 2 Крим

**1927** 11 вересня

⊕ **8 балів**

⊙ Значні руйнування вздовж усього узбережжя від Севастополя до Феодосії

#### 3 Закарпаття

**1926** 28 червня

⊕ **7 балів**

**1979** 22 вересня

⊕ **6—7 балів**

**2006** 23 листопада

⊕ **4,5 бала**

⊕ сила поштовхів в епіцентрі

⊙ сила поштовхів на периферії

Джерело: Інститут геофізики НАН України

© Ukrainian Media Service

Рисунок 1.3 – Сейсмоактивні зони України

У сейсмічному відношенні найбільш небезпечними областями в Україні є Закарпатська, Івано-Франківська, Чернівецька, Одеська та Автономна Республіка Крим. На теренах Закарпаття відзначаються осередки землетрусів з інтенсивністю 6–7 балів (за шкалою Ріхтера) у зонах Тячів – Сигет, Мукачево – Свалява. Закарпатська сейсмоактивна зона характеризується проявом

землетрусів, що відбуваються у верхній частині земної кори на глибинах 6–12 км з інтенсивністю в епіцентрі 7 балів. Шестибальні землетруси зафіксовані також у Прикарпатті (Буковина). Прикарпаття відчуває вплив від району Вранча (Румунія).

В 1974–1976 роках тут мали місце землетруси інтенсивністю від 3 до 5 балів. Сейсмонебезпечність Одеської області зумовлена осередками землетрусів у масиві гір Вранча та Східних Карпат у Румунії. Починаючи з 1107 року і до цього часу там мали місце 90 землетрусів з інтенсивністю 7–8 балів. Кримсько-чорноморська сейсмоактивна зона огинає з півдня Кримський півострів. Осередки сильних корових землетрусів тут виникають на глибинах 20–40 км та 10–12 км на відстані 25–40 км від узбережжя з інтенсивністю 8–9 балів. За останні два століття на Південному узбережжі Криму зареєстровано майже 200 землетрусів від 4 до 7 балів. Південно-Азовську сейсмоактивну зону виділено зовсім недавно. У 1987 році було зафіксовано кілька землетрусів інтенсивністю 5–6 балів. Крім того, за палеосейсмотектонічними та археологічними даними встановлено сліди давніх землетрусів інтенсивністю до 9 балів із періодичністю близько одного разу на 1000 років.

У платформній частині України виділено ряд потенційно сейсмотектонічних зон з інтенсивністю 4–5,5 бала. За інженерно-сейсмічними оцінками приріст сейсмічності на півдні України перевищує 1,5 бала, і у зв'язку з чим було визначено, що в окремих районах 30–50 % забудови не відповідає сучасному рівню сейсмічного та інженерного ризику.

Попередити землетруси точно поки що неможливо. Прогноз справджується лише у 80 % випадків і має орієнтовний характер. Серед всіх стихійних лих за даними ЮНЕСКО, землетруси займають перше місце в світі за заподіяною економічною шкодою і кількістю загиблих.

*Вулканізм.* Це сукупність явищ, зумовлених проникненням магми з глибини землі на її поверхню. Процеси грязьового вулканізму локалізовані у південній частині території України. Вони спостерігаються на Керченському півострові та прилеглий акваторії Азовського моря. В останні роки виявлено грязьові вулкани на захід та південь Севастополя в акваторії Чорного моря.

Серед діючих грязьових вулканів виділяються з постійно спокійним режимом виверження та з активними викидами протягом кількох діб, що супроводжується вибухами та локальними землетрусами. Внаслідок детальних геологічних досліджень встановлено взаємозв'язок багатьох діючих вулканів із зонами активних розломів, наприклад, Південно-Азовського та інших.

Матеріальні втрати від вивержень грязьових вулканів є досить значними. Знищуються будівлі, селища. Активні вулкани виділяють пари ртуті, вміст якої в атмосферному повітрі під час виверження зростає на 1–2 порядки. Це призводить до виникнення геохімічних аномалій, шкідливих для здоров'я людини.

Особливої уваги заслуговують отримані в останні роки дані про активізацію грязьових вулканів у зоні Південно-Азовського розлому, що сприяє ви-

никненню нових островів та мілин в акваторії Азовського моря та Керченської протоки. Це може стати причиною погіршення умов судноплавства.



Рисунок 1.4 – Внутрішня будова вулкана

#### *Стихійні явища екзогенного походження*

Якщо оцінювати площу України з точки зору негативних екзогенних природних процесів, можна виділити площі з різним ступенем ризику виникнення природного (або стихійного) лиха.

Широкий розвиток мають різні види екзогенних геологічних процесів природного та техногенного походження:

*Селі.* Сель – раптово сформований, внаслідок різкого підйому води в руслах гірських річок, грязьовий потік. Причинами виникнення селевих потоків майже завжди бувають сильні зливи, інтенсивне танення снігу та льоду, промивання гребель водойм, а також землетруси та виверження вулканів. Їх виникненню сприяють і антропогенні фактори: вирубка лісів і деградація ґрунтів на гірських схилах, вибухи гірських порід під час прокладання доріг, роботи у кар'єрах, неправильна організація обвалів та підвищена загазованість повітря, що згубно діє на ґрунтово-рослинний покрив.

Імовірність зародження селів залежить від складу та будови гірських порід, їх здатності вивітрюватись, рівня антропогенної дії на район та ступеня його екологічної деградації. Вивітрювання – це процес механічного руйнування і хімічної зміни гірських порід та мінералів. Інтенсивність та швидкість вивітрювання характеризуються природними умовами (атмосферні опади, вітер, коливання температури повітря та ін.).

До селевого басейну відноситься гірська територія з прилеглими схилами, на яких знаходяться складові зруйнованих гірських порід, його витoki, всі його русла, водозбір, а також район його дії.

Процес виникнення і розвитку селів відбувається у три етапи: перший – накопичення в руслах селевих басейнів рихлого матеріалу за рахунок вивітрювання гірських порід та гірської ерозії; другий – переміщення рихлих гірських матеріалів по гірських руслах з підвищених ділянок у нижчі; третій – розосередження селевих виносів у гірських долинах.

Рух селів – це суцільний потік із каміння, бруду та води. Вони мають у своєму складі тверді матеріали (10–75 % від всього об'єму) і рухаються зі швидкістю від 2 до 10 м/с. Об'єми селевого потоку можуть досягати сотень тисяч – мільйонів кубічних метрів, а розміри уламків – до 3–4 м у поперечнику і бути масою до 100–200 тонн. Передній фронт селевої хвилі створює «голову», висота якої може досягати 25 метрів.

За складом розрізняють потоки: *грязьові* – суміш води, невеликої кількості землі та дрібного каміння; *брудокам'яні* – суміш води, гравію, гальки та невеликого каміння; *водокам'яні* – суміш води з камінням великого розміру.

За потужністю (об'ємом) вони можуть бути *катастрофічні*, *потужні*, *середньої* та *малої потужності*. *Катастрофічні* характеризуються виносом матеріалу понад 1 млн м<sup>3</sup> і спостерігаються на земній кулі один раз на 30–50 років. *Потужні* виносять матеріал об'ємом в 100 м<sup>3</sup> і виникають рідко. При селях *малої потужності* виноситься матеріалу близько 10 тис. м<sup>3</sup> і виникають такі селі щорічно, іноді по декілька разів на рік.

Найбільш широкого поширення селеві процеси набули у гірських районах Карпат та Криму, на правому березі Дніпра. Наприклад, з періодичністю 11–12 років спостерігаються селі в долинах ярів, що розташовані на Південному березі Криму. До катастрофічних відносяться селі з об'ємом виносу 10–100 тис. куб. м та періодичністю 1–5 років. Кількість ураження селевими потоками складає від 3 до 25 % території України. У Криму вони поширюються на 9 % території, в Закарпатській області – на 40 %, в Чернівецькій – 15 %, в Івано-Франківській – 33 %.

*Карст.* На 60 % території України розвиваються карстові процеси. Це явище, яке пов'язане з розчиненням природними водами гірських порід. В деяких областях України ступінь ураженості карстовими процесами сягає 60–100 % території. При цьому характерними є явища карбонатного, сульфатного, соляного карсту. Особливу небезпеку викликають ділянки розвитку відкритого карсту (вирви, колодязі, провалля), що становить 27 % від всієї площі карстоутворення. Найбільш розвинутий відкритий карст на території Волинської області на площі 594 км<sup>2</sup>, Рівненської – 214 км<sup>2</sup>, Хмельницької – 4235 км<sup>2</sup>.

*Зсуви.* Одним із найнебезпечніших і дуже поширених природних явищ є зсуви. Зсуви властиві західним областям України, а також узбережжю Чорного та Азовського морів.

Зсуви – це зміщення вниз по укосі під дією сил тяжіння великих ґрунтових мас, що формують схили гір, річок, озерних та морських терас.

Зсуви можуть бути викликані як природними, так і штучними (антропогенними) причинами. До *природних* відносяться: збільшення крутизни схилів, підмивання їх основи морською чи річковою водою, сейсмічні поштовхи.

*Штучними* причинами є: руйнування схилів дорожніми канавами, надмірним виносом ґрунту, вирубкою лісів, неправильним вибором агротехніки для сільськогосподарських угідь на схилах. Згідно з міжнародною статистикою до 80 % сучасних зсувів викликані діяльністю людини.

Зсуви формуються переважно на ділянках, зволжених водостійкими та водоносними породами ґрунтів, коли сила тяжіння накопичених на схилах продуктів руйнування гірських порід, переважно в умовах зволоження, перевищує сили зчеплення ґрунтів.

Виникають зсуви у випадку крутизни схилу  $10^\circ$  і більше. На глиняних ґрунтах, при надмірному зволоженні, вони можуть виникати і при крутизні  $5\text{--}7^\circ$ .

За глибиною залягання зсуви бувають: поверхневі (1 м); мілкі (5 м); глибокі (до 20 м); дуже глибокі (понад 20 м); за типом матеріалу:

- кам'яні (граніт, гнейс);
- ґрунтові (пісок, глина, гравій).

В залежності від потужності вони поділяються на:

- малі (до 10 тис. м<sup>3</sup>);
- великі (до 1 млн м<sup>3</sup>);
- дуже великі (понад 1 млн м<sup>3</sup>).

Зсуви можуть бути *активними* і *неактивними*. На активність впливає гірська порода схилу, що складає основу зсуву, а також наявність вологи. Швидкість руху зсуву становить від 0,06 м/рік до 3 м/с.

Площі зсувонебезпечних процесів за останні 30 років збільшились у 5 разів. Вони поширені майже на половині території України. Найбільшого поширення вони набули у Закарпатській, Івано-Франківській, Чернівецькій, Миколаївській, Одеській, Харківській областях та в Криму. Найбільше зустрічаються *зсуви видавлювання* (розміром до 5 км) та *зсуви-потоки*. У Кримських горах зустрічаються блокові та лінійні зсуви довжиною 0,5–2,5 км та шириною 0,3–1,5 км. Значною мірою зсувами охоплені береги каскаду Дніпровських водосховищ, де найбільш поширеними є *зсуви спливання*, а також *фронтальні зсуви*, які ще існують на узбережжі Азовського та Чорного морів. Загалом на морських узбережжях довжиною 2630 км<sup>2</sup> проявляються абразійні процеси – руйнується майже 60 % узбережжя. В районах активної господарської діяльності, таких як Прикарпаття, Крим, Донбас, Одеська, Дніпропетровська, Хмельницька та інші промислові міські агломерації, зафіксовано 138 тисяч зсувів.

*Обвали, осипи*. Це відрив і катастрофічне падіння великих мас гірських порід, їх дроблення і скочування з круч, урвищ та схилів. Обвали природного походження спостерігаються у горах, на берегах морів, обривах річкових долин. Це результат послаблення зв'язаності гірських порід під дією процесів вивітрювання, підмиву, розчинення та дії сил тяжіння. Їх виникненню сприяє геологічна будова місцевості, наявність на схилах тріщин та зон дроблення гірських порід.

Найчастіше (до 80 %) сучасні обвали пов'язані з антропогенним фактором. Вони виникають переважно у випадку неправильного проведення робіт, при будівництві та гірських розробках.

Осип – це нагромадження щебеню чи ґрунту біля підніжжя схилів.

Райони Карпатських та Кримських гір підпадають під дію обвалів та осипів, деякі з них мали катастрофічний характер та призвели до людських втрат, як, наприклад, Демерджинський обвал 1896 року.

*Абразія.* Це процес руйнування хвилями прибою берегів морів, озер та водосховищ. Абразійний процес найбільш поширений на Чорноморському узбережжі. У береговій зоні Криму щорічно зникає 22 га узбережжя, між дельтою Дунаю та Кримом – 24 га, у північній частині Азовського моря – 19 га. Абразії зазнає до 60 % берегів Азовського та до 30 % Чорного морів. Швидкість абразії становить у середньому 1,3–4,2 метра на рік.

*Метеорологічно небезпечні явища*

Протягом останнього десятиріччя в Україні зафіксовано близько 240 випадків виникнення катастрофічних природних явищ метеорологічного походження зі значними матеріальними збитками.

Небезпечні метеорологічні явища, що мають місце в Україні: сильні зливи (Карпатські та Кримські гори); град (на всій території України); сильна спека (степова зона); суховії, посухи (степова та східна лісостепова зони); урагани, шквали, смерчі (більша частина території); пилові бурі (південний схід степової зони); сильні тумани (південний схід степової зони); сильні заметілі (південний схід степової зони); снігові заноси (Карпати); значні ожеледі (степова зона); сильний мороз (північ Полісся та схід лісостепової зони). Крім того, уздовж узбережжя та в акваторії Чорного і Азовського морів мають місце шторми, ураганні вітри, смерчі, зливи, обмерзання споруд та суден, сильні тумани, заметілі, ожеледі.

В Україні щорічно спостерігається до 150 випадків стихійних метеорологічних явищ. Частіше за все повторюються сильні дощі, снігопади, ожеледі, тумани. Рідше бувають пилові бурі, крижані обмерзання.



**Рисунок 1.5 – Через снігопад в Україні протягом 23 грудня 2020 року в ДТП 13 осіб загинуло та 64 – травмовано**

(<https://www.meteoprog.ua/ua/news/588335-cerez-snig-v-ukrayini-protyagom-dnya-v-dtp-zaginuli-13-colovik.html>)

Найбільше потерпає від впливу стихійних метеорологічних явищ степова зона, де відмічаються явища, притаманні як для теплого (сильна спека, пилові бурі, суховії, лісові пожежі), так і холодного (сильні морози, сильна ожеледь) періоду року.

Для Українських Карпат найбільш характерними є сильні зливи, що викликають селеві та зливові потоки, град, сильні вітри, тумани, заметілі, сильні снігопади.

Узбережжя Чорного та Азовського морів знаходиться в зоні впливу атмосферних явищ, характерних для морського клімату.

*Сильні дощі.* В Україні серед стихійних явищ найбільш частими є сильні дощі (зливи). Вони спостерігаються щорічно і поширюються на значні території. Частіше за все вони бувають у Карпатах та в горах Криму.



**Рисунок 1.6 – Україну накрив циклон: сніг, дощ і сильний вітер**  
(<https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/2423550-ukrainu-nakriv-ciklon-snig-dos-i-silnij-viter.html>)

*Град.* В теплий період року сильні дощі супроводжуються градом, що завдає відчутних збитків сільськогосподарським культурам. Град – це атмосферні опади у вигляді частинок льоду неправильної форми. Найчастіше град випадає у гірських районах Криму та Карпат.

У 40 % випадків випадіння граду спостерігається дрібний інтенсивний град. Великий град відмічається в період із кінця серпня до середини вересня в Автономній Республіці Крим, в Полтавській, Чернівецькій, Тернопільській областях, менший – в Сумській, Луганській, Запорізькій, Миколаївській, Одеській та Херсонській областях.

*Сильна спека.* У степовій зоні щорічно буває сильна спека з температурою вище 30 °С, причому в деякі роки вона перевищує 40 °С.



Рисунок 1.7 – Протягом 18–21 серпня 2020 року температура повітря в Україні тільки підвищувалася, у більшості регіонів вдень стовпчики термометрів піднялися до +30 градусів і навіть вище (<http://dialogs.org.ua/people/42110/>)

*Суховії.* В Україні інтенсивні суховії спостерігаються майже щорічно. Суховії – це вітри з високою температурою і низькою відносною вологістю повітря. Під час суховіїв посилюється випаровування, що за недостатності вологи у ґрунті часто призводить до в’янення та загибелі рослин. Найбільшої дії суховіїв зазнає степова зона, а також, частково, зона лісостепу.

*Посухи.* Тривала нестача опадів, частіше за підвищеної температури та низької вологості повітря, що викликає зниження запасів вологи у ґрунті, та, як наслідок, – погіршення росту, а іноді й загибель рослин. Найчастіше вони зустрічаються на півдні степової зони.

*Ураганні вітри.* Ураган – це вітер силою 12 балів за шкалою Бофорта. На більшій частині території України вітри зі швидкістю більше 25 м/с бувають майже щорічно. Найчастіше – в Карпатах, в горах Криму та на Донбасі.

*Циклони* – область низького тиску в атмосфері з мінімумом у центрі. Погода при циклонах переважно похмура із сильними вітрами. В Азово-Чорноморському басейні виділяються своїми руйнівними наслідками осінні циклони. За своїми властивостями, походженням та наслідками вони схожі на тропічні урагани. На Азовському морі циклони часто призводять до штормів, які супроводжуються місцевим підняттям рівня моря.

*Шквали.* Шквали можуть виникати в будь-яких місцях України, але найчастіше відбуваються у степовій, лісостеповій зоні та Поліссі. Це різке ко-



роткочасне посилення вітру, іноді – до 30–70 м/с зі зміною його напрямку. Найчастіше це явище спостерігається під час грози.



Рисунок 1.8 – 14 червня 2020 року в Україні були грози, у західних та центральних областях – подекуди град та шквали 15–20 м/с, в Карпатах – значні дощі (<https://tva.ua/2020/06/14/sohodni-v-ukraini-ochikuiutsia-hrozy-hrad-ta-shkvaly-dsns/>)

Штормовий (шквальний) вітер на території України спостерігається дуже часто, а його швидкість буває від 20 до 29 м/с, а іноді – й більше 30 м/с. У гірських масивах Криму і Карпат, західних і північно-західних областях країни швидкість вітру досягає 40 м/с.

Шквалонебезпечна ситуація може виникнути на всій території України. Один раз на 3–5 років шквали виникають у Вінницькій, Волинській, Дніпропетровській, Донецькій, Житомирській, Кіровоградській, Київській, Одеській, Львівській, Харківській, Херсонській областях та на території Криму.

*Смерчі.* Це атмосферний вихор, що виникає у грозовій хмарі та поширюється у вигляді темного рукава або хобота (частіше декількох) за напрямком до поверхні суші або моря. Він супроводжується грозою, дощем, градом і якщо досягає поверхні землі, майже завжди завдає значних руйнувань, вбираючи у себе воду та предмети, що зустрічаються на його шляху, піднімаючи їх високо над землею і переносячи на значні відстані. Руйнівну дію цієї стихії можна порівняти з дією ударної хвилі ядерної зброї. Смерчі супроводжуються сильними зливами і градом, що посилює їх небезпечність. Це найменша за розмірами та найбільша за швидкістю обертання форма вихрового руху повітря. За співвід-

ношенням довжини та ширини виділяють дві групи смерчів: змієподібні (лійкоподібні) та хоботоподібні (колоноподібні); за місцем виникнення вони поділяються на такі, що сформувалися над сушею, й такі, що сформувалися над водою, за швидкістю руйнувань – швидкі, середні та повільні.



Рисунок 1.9 – У південній частині України все частіше проносяться смерчі (<https://ukraine.segodnya.ua/ukraine/ekspert-predupredila-ob-opasnom-stihiynom-bedstvii-v-ukraine-1154461.html>)

В Україні рідко складаються умови для формування смерчів, в основному це явище спостерігається в серпні. За останні 20 років зареєстровано 34 випадки. Найбільш характерними вони є для степової зони та центрального Полісся. Невеликі смерчі спостерігаються майже щорічно і мають локальний характер. Смерчі завдають значних збитків об'єктам господарювання і призводять до людських жертв.

*Пилові бурі* – це складні атмосферні явища, що характеризуються перенесенням пилу та піску із сильними та тривалими вітрами, що знищують поверхню ґрунту. Пилові бурі за кольором та складом пилу, який переноситься, бувають: чорні (чорноземи); бурі та жовті (суглинок, супісок); червоні (суглинки з домішками окислів заліза) та білі (солончаки). Дуже часто бувають короткочасні чорні бурі тривалістю до однієї години; велика їх кількість також може бути тривалістю від 10 до 12 годин і порівняно рідко такі бурі бувають тривалістю понад добу. Червоні бурі тривають довше – протягом декількох днів. Висота підйому пилу може досягати 2–3 км, але найчастіше – 1–1,5 км. В зимово-весняний період у центральних та південних областях України спостерігаються сніжно-пилові бурі.

*Сильні снігопади і заметілі.* Сильні снігопади найчастіше спостерігаються в Карпатах, а також у лісостеповій та степовій зонах.

На території Закарпатської, Івано-Франківської та Львівської областей снігопади бувають щорічно протягом січня–лютого, а у прилеглих районах до Карпат – іноді і в травні.

В основному по території України кількість снігових опадів складає 20–30 мм, іноді сягає 40–70 мм. В Карпатах в окремих випадках випадає більше 100 мм.

Один раз на три роки великі снігопади можна спостерігати на території Автономної Республіки Крим, Вінницької, Київської, Чернівецької та Черкаської областей, один раз на п'ять років – на території Запорізької, Дніпропетровської, Сумської, Тернопільської, Рівненської, Миколаївської та Чернігівської областей.

Заметілі виникають майже щорічно в різних районах, особливо в Карпатах, Криму, а також у Донбасі.

*Сильні морози.* В Україні в зимовий період спостерігаються сильні морози, що сягають  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  та нижче.

Найбільш холодна частина країни – східні й північно-східні області (Луганська, Сумська, Харківська, Чернігівська) та гірські райони Карпат. В цих місцевостях буває температура нижче  $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

*Сильні ожеледі.* Небезпечні ситуації пов'язані з виходом південних циклонів. Ожеледь виникає на земній поверхні та на предметах при намерзанні переохолоджених крапель дощу або туману за температури повітря нижче  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Сильні ожеледі можуть виникати з листопада до березня, а найчастіше бувають у грудні–січні.

Особливо часто вони виникають на території Донецького Кряжу, Приазовській, Волинській, Подільській височинах та на гірській частині Криму. Товщина обмерзань сягає 35 мм та більше.

Визначальним фактором небезпечності ожеледі є не інтенсивність, а тривалість цього явища. Сильна ожеледь триває від кількох годин до кількох діб.

*Тумани.* Тумани погіршують видимість на шляхах, створюють перешкоди для роботи різних видів транспорту, сприяють забрудненню повітря.

Сильні тумани спостерігаються переважно в холодну пору року. Найчастіше вони виникають у гірських районах Криму і Карпат та іноді – на південному березі Криму.

Сезон туманів починається у жовтні, а закінчується у квітні. Кількість днів із туманами тут становить близько 100, а із сильними туманами – до 80.

На підвищених територіях центральної та південної частини України (Донецький Кряж, Приазовська, Волинська, Подільська, Придніпровська височини) кількість днів із туманами складає близько 80, із сильними туманами – до 30.

На рівнинній території південної частини Степової зони тумани бувають близько 30 днів на рік, а сильні – 10–20 днів протягом року.

*Гідрологічні надзвичайні ситуації.* Гідрологічними небезпечними явищами, що мають місце в Україні, є: повені (басейни річок); селі (Карпатські та Кримські гори); маловоддя, крім тих, що уздовж узбережжя та в акваторії Чорного і Азовського морів мають місце небезпечні підйоми та спади рівня моря.



**Рисунок 1.10 – 10 листопада 2020 року вночі та вранці у західній частині країни туман, видимість – 200–500 м. Погодні умови можуть призвести до порушення руху транспорту на окремих ділянках доріг і вулиць (<https://4studio.com.ua/novyny/vodiyiv-poperedzhayut-pro-sylni-tumany-na-zahodi-ukrayiny/>)**

Протягом майже 20 років стабільні акумулятивні форми Наксько-Євпаторійської системи внаслідок дії техногенних факторів руйнуються зі швидкістю 3,5 км щороку. Щорічно безповоротно втрачається більше 100 га прибережних територій, зменшується пляжна смуга, знижується біологічна продуктивність моря. Під постійною загрозою руйнування знаходяться розташовані в береговій лінії матеріальні цінності (житлові будинки, курортні комплекси, інженерні комунікації, сільгоспугіддя). Матеріальні збитки від впливу на узбережжя Чорного та Азовського морів сильних штормів 1969, 1971, 1983, 1992 рр. складають 520–600 млн гривень.

Основними причинами посилення темпів руйнування морських берегів є як природні фактори, пов'язані з тектонічними зануреннями північного Приазов'я, так і антропогенні, до яких відноситься зарегульованість твердого стоку рік, забруднення водних басейнів і пов'язане з цим зниження їх продуктивності, безсистемна забудова берегової смуги та кіс, будівництво берегозахисних споруд, які не відповідають характеру гідродинамічних процесів, використання малоефективних або навіть шкідливих берегозакріплювальних заходів, відступи від проєктних рішень, безконтрольне вивезення піску із кіс, порушення протизсувного режиму під час забудови терас та інші шкідливі наслідки господарської діяльності на узбережжі.

В гірських частинах Карпат і Криму розвиваються селеві процеси. Близько 30 міст, селищ та сільських населених пунктів у Криму, Закарпатській, Івано-Франківській, Чернівецькій та Львівській областях знаходяться під впливом селевих потоків. Всього в Карпатах виявлено 219 селевих водозаборів. Найбільшою активністю характеризуються басейни рік Черемоша, Дністра, Тиси, Прута. В лютому–березні та в період відлиг райони хребтів Горгани, Полонинський, Чорногори є лавинонебезпечними з обсягом снігових лавин до 300 тисяч м<sup>3</sup>. Шість населених пунктів у Закарпатті зазнають впливу снігових лавин.

*Повені.* Значна кількість грошових та матеріальних ресурсів щороку витрачається на ліквідацію наслідків повеней на річках України. Повені виникають під час тривалих злив та внаслідок танення снігу, вітрових нагонів води, при заторах. Найбільш імовірними зонами можливих повеней на території України є:

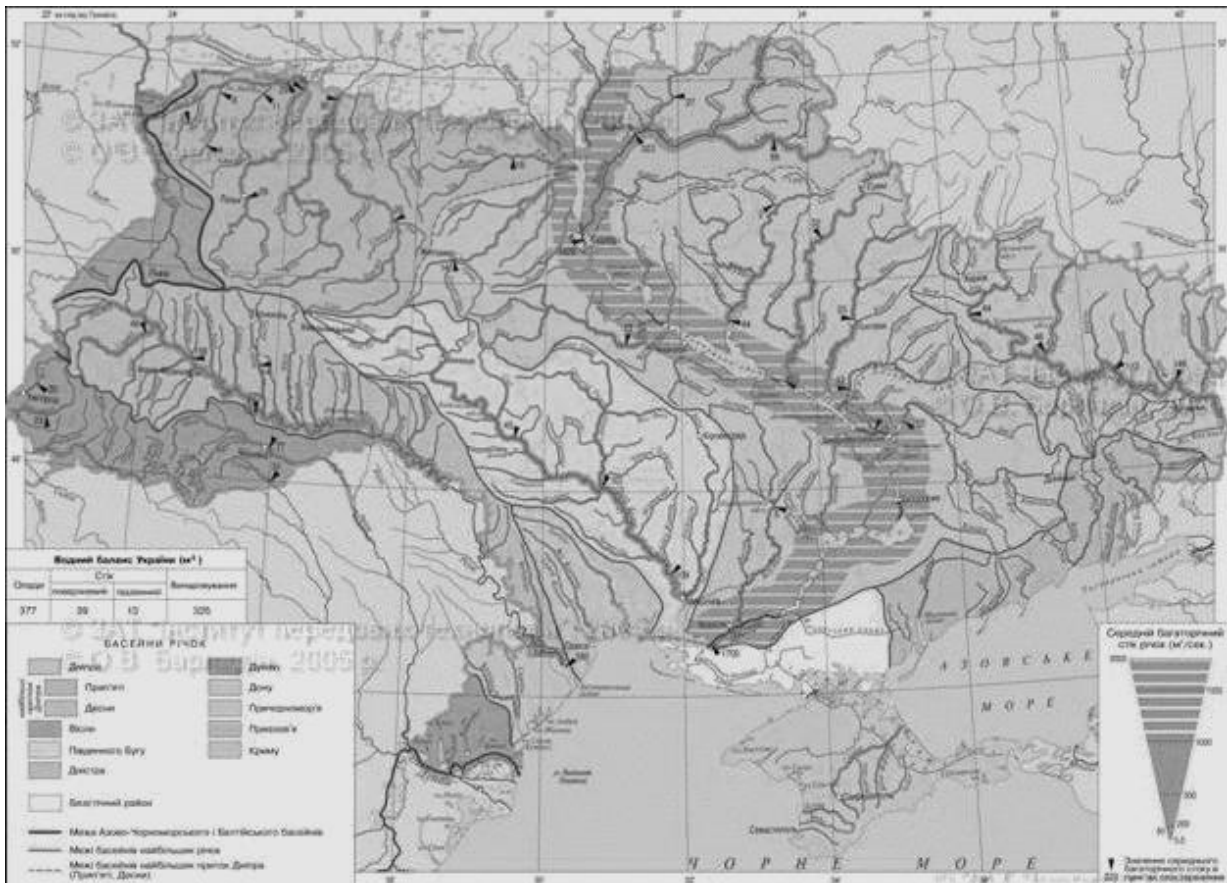
- у північних регіонах – басейни річок Прип'ять, Десна та їх приток. Площа повені лише в басейні р. Прип'ять може досягти 600–800 тис. га;
- у західних регіонах – басейни верхнього Дністра (площа може досягти 100–130 тис. га), річок Тиса, Прут, Західний Буг (площа можливих затоплень – 20–25 тис. га) та їх приток;
- у східних регіонах – басейни р. Сіверський Донець із притоками, річок Псьол, Ворскла, Сула та інших приток Дніпра;
- у південному і південно-західному регіонах – басейни приток нижнього Дунаю, р. Південний Буг та її приток.

На значній території України (Карпати, Крим) річки мають виражений паводковий режим стоку. В середньому за рік тут буває 6–7 повеней. Вони формуються в будь-який сезон року і часто мають катастрофічні наслідки, зумовлюють масові руйнування та загибель людей.

Повені на гірських річках (Дністер, Тиса, Прут, річки Криму) формуються дуже швидко, що висуває високі вимоги щодо оперативності прогнозування та оповіщення.

За останні сорок років катастрофічні повені Карпат та Криму спостерігались 12 разів. Яскравим прикладом таких повеней можуть бути снігові та дощові повені на річках Закарпаття у листопаді 1992 р. та грудні 1993 р., восени 1998 р, коли постраждало багато населених пунктів, промислових об'єктів, споруд, були людські жертви. Такі повені трапляються в середньому один раз на 5–10 років. Тривалість повеней (затоплень) може досягти від 7 до 20 діб і більше. При цьому можливе затоплення не тільки 10–70 % сільгоспугідь, але й великої кількості техногенно небезпечних об'єктів.

Високі повені більш властиві річкам Дніпро, Дністер, Дунай і Сіверський Донець. Вони супроводжуються затопленням значних територій та викликають необхідність часткової евакуації людей, тварин, завдають відчутних матеріальних збитків. Рівні води під час весняних повеней на рівнинних річках зростають повільніше, але й небезпека негативних наслідків зберігається довше. У зоні затоплення можуть опинитись і хімічно небезпечні об'єкти.



**Рисунок 1.11 – Карта річок України**

У 1998 році, внаслідок сильних дощів і підвищення рівня ґрунтових вод, сталися сильні паводкові підтоплення у Миколаївській, Запорізькій, Херсонській, Дніпропетровській, Рівненській та Львівській областях. У зоні катастрофічного затоплення опинилося понад 200 населених пунктів у 35 районах.

Наслідки: загинуло 17 осіб; підтоплено понад 120 населених пунктів; у зоні стихійного лиха опинилася третина населення області – це приблизно 350 тис. людей; відселено із зони стихійного лиха понад 20 тис. осіб; зруйновано більше 2,5 тис. будинків, підтоплено більше 40 тис. помешкань; знищено 12 мостів, 48 – пошкоджено; зруйновано майже 50 км доріг, пошкоджено – більше 700 км; зруйновано 2,4 км залізничних доріг, пошкоджено – понад 3 км; виведено з ладу 18 водозаборів, 28 каналізаційних насосних станцій, 20 очисних споруд та 45 котелень.

Збитки: 822 млн грн.

Березень 2001 року. Знову Закарпаття. Через сильні зливи у басейні річок випало більше 300 мм опадів. До речі, саме повені 1998-го та 2001 років зруйнували єдиний в Європі й один із двох у світі музей лісосплаву на Чорній річці.

Наслідки: загинуло 9 осіб; підтоплено 255 населених пунктів, більше 33 тис. будинків; знеструмлено 98 населених пунктів, через що майже 14 тис. осіб було евакуйовано; зруйновано майже 2 тис. помешкань; знищено 6 та пошкоджено 17 мостів; пошкоджено майже 53 км автодоріг.



Рисунок 1.12 – Повінь на Закарпатті, 2001 рік  
(<https://fakty.com.ua/ua/ukraine/20180429-najmasshtabnishi-poveni-v-ukrayini-za-100-rokiv/>)

Збитки від стихії: 317 млн грн.

Липень 2008 року. Також однією з найбільших за всю історію Західної України повеней вважають повінь, що сталося у липні 2008 року. Тоді після сильних дощів річки регіону вийшли з берегів.

Зонами надзвичайної екологічної ситуації було оголошено 6 областей: Львівської, Івано-Франківської, Тернопільської, Чернівецької, Закарпатської і Вінницької. Також постраждали південні райони Хмельницької області.

Наслідки: загинуло 39 осіб; підтоплення більше 40 тис. будинків; затопило більше 800 га сільськогосподарських угідь; пошкоджено 360 автомобільних та 561 пішохідний міст; розмито понад 680 автомобільних доріг.

Збитки від стихії: 3–4 млрд грн.

Червень–липень 2010 року. Від повені, спричиненої сильними дощами, тоді постраждала не тільки західна Україна, а й Польща, Чехія, Словаччина, Угорщина, Австрія та Сербія.

На території Львівської, Івано-Франківської та Закарпатської областей пішли під воду 20 населених пунктів.

Лише селам Мукачівського району повінь завдала збитків майже на 12 млн грн. Велика вода прийшла так стрімко, що люди навіть не встигли по-виносити майно.

*Природні пожежі.* Щорічно в суху, жарку погоду небезпека від лісових та торф'яних пожеж різко зростає.

Лісові пожежі виникають, головним чином, з вини людини та внаслідок дії деяких природних чинників. Причиною пожеж буває виробнича діяльність людини (спалювання відходів на прилеглих до лісу територіях) та її необережність (вогнища, недопалки, сірники). Вогонь може швидко розростися і, підхоплений вітром, сягати вогненним валом, що знищує на своєму шляху все живе, перетворює ліси в нежиттєздатні пустелі. При цьому виникає велика загроза населеним пунктам, життю людей, домашнім тваринам, матеріальним цінностям.

Найбільш небезпечними бувають жаркі та сухі літні дні з відносною вологістю повітря 30–40 %.

Залежно від характеру горіння, швидкості поширення вогню та розмірів пошкодження лісу розрізняють чотири категорії лісових пожеж: низові (або низинні); верхові (або повальні); підземні (торф'яні або ґрунтові) та пожежі дуплистих дерев.

Найбільш поширеними є низові пожежі, частка яких складає близько 80 % усіх випадків можливих пожеж.

*Низові (низинні) пожежі* розвиваються внаслідок згорання хвойного підліску, живого надґрунтового покриву (моху, лишайника, трав'янистих рослин, напівчагарників і чагарників) або підстилки (опалого листя, хвої, кори, сушняку, хмизу, вітролому, бурелому, гнилих пнів), тобто рослин та рослинних залишків, розташованих безпосередньо на ґрунті або на невеликій висоті (півтора-два метри). Полум'я має висоту до 50 см, швидкість розповсюдження вогню при цьому невелика – сто-двісті метрів за годину, а у разі сильного вітру – до кілометра в рівнинній місцевості та від одного до трьох кілометрів.

*Верхові лісові пожежі* розвиваються із низових, і відмінність їх полягає у тому, що згорає не тільки надґрунтовий покрив, але і нижні яруси дерев та крони чагарників. Можуть бути ще і вершинні пожежі, коли вогнем знищуються лише крони дерев. Але без супроводу низинної пожежі вони довго продовжуватися не можуть. При верхових пожежах виділяється багато тепла. Висота полум'я при цьому становить 100 і більше метрів. В таких випадках вогонь перекидається на значні відстані, іноді – на декілька сотень кілометрів, тому що швидкість пожежі зростає до 8–25 км за годину.

*Підземні (ґрунтові або торф'яні) пожежі* виникають часто в кінці літа, як продовження низових або верхових. Заглиблення низового вогню починається біля стовбурів дерев, потім воно поширюється в різні сторони до декількох метрів за добу. В осередках ґрунтових пожеж виникають завали із впадлих дерев і ділянок згорілого торфу. Однак *торф'яні пожежі* можуть бути і не наслідком лісових. Вони часто захоплюють величезні простори і дуже важко гасяться. Небезпека їх полягає у тому, що горіння виникає під землею, створюючи порожні місця у торфі, який уже згорів. Задимлюються великі райони, що подразнювально діє на людей і ускладнює боротьбу з пожежею; обмежує видимість; негативно психологічно впливає на населення.





**Рисунок 1.13 – Природна пожежа в Луганській області, 2020 рік. Вогнем охоплено 19822 гектари лісу ДП «Новоайдарське ЛМГ», в тому числі верхової 9160 гектари (<https://mepr.gov.ua/news/36009.html>)**

Частіше за все пожежонебезпечні умови складаються у Степовій, Поліській та Лісостеповій зонах, в горах Криму. Найбільш поширеними є лісові та торф'яні пожежі, бо ліси і торфовища займають більше 10 млн га території України. 31 % лісів розташовано в північному регіоні, 17 % – в східному, 10 % – в південному, 8 % – в південно-західному і 32 % – в західному регіоні.

Лісовий фонд України майже на 50 % складається із хвойних лісів, з яких 60 % займають молодняки. В результаті широкомасштабних робіт із заліснення на сотнях тисяч гектарів створено соснові насадження, які досягли критичного, в пожежному відношенні, віку – 15–30 років.

Ліси України в більшості її регіонів не спроможні витримати зростаючого потоку відпочиваючих, оскільки їх площа є значно меншою від науково обґрунтованих норм. Така ситуація найбільш характерна для Херсонської, Миколаївської, Луганської, Донецької, Полтавської областей, Автономної Республіки Крим, що вважаються найбільш пожежонебезпечними.

В середньому за рік, в залежності від погодних умов, виникає близько 3,5 тисяч пожеж, якими знищується більше 5 тисяч гектарів лісу. Найбільш пожежонебезпечними є північний та східний регіони; щорічно виникає в середньому відповідно 37 і 40 % всіх лісових пожеж.

*Масові інфекційні захворювання та отруєння людей. Серед інфекційних захворювань людей найбільш поширеними на території країни є: дифтерія, кашлюк, правець, поліомієліт, кір, епідемічний паротит, гострі кишкові інфе-*

кційні хвороби. У країні широко розповсюджені активно діючі природні осередки багатьох небезпечних інфекцій – туляремії (у 23 областях), лептоспірозу (у всіх регіонах), сибірки (у 16 областях), лихоманки (у 9 областях), кліщового енцефаліту (у 8 областях), геморагічної пропасниці з нирковим синдромом (у 10 областях), вірусу Західного Нілу (в 7 областях), Каліфорнійського енцефаліту (в 7 областях), вірусу Укуніємі (у 6 областях).

Існують епідеміологічні свідчення про необхідність вивчення нозоареалу, псевдотуберкульозу, лістеріозу, хвороби Лайма та інших природно-осередкових інфекцій.

За розрахунковими даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, імовірна кількість ВІЛ-інфікованих в Україні до 2000 року досягне 200000 осіб. Існує проблема створення бази для забезпечення медичної, соціальної допомоги цим хворим, що так само потребує значних витрат.

З огляду на інтенсифікацію міжнародних сполучень України, в тому числі з країнами, де розповсюджені вищезазначені хвороби, існує реальна повсякденна загроза їх занесення на територію держави. Тому готовність до своєчасної діагностики збудників цих хвороб є вирішальною у справі організації профілактичних та протиепідемічних заходів щодо їх розповсюдження і має велике державне значення у протиепідемічному захисті населення країни.

Найбільша кількість надзвичайних ситуацій припадає на випадки отруєння людей харчовими продуктами, токсичними та іншими речовинами.

Новий коронавірус 2019 року (SARS-CoV-2, або 2019-nCoV) – це новий вірус, який спричиняє розвиток респіраторних захворювань у людей (зокрема гострої респіраторної хвороби COVID-19) та може передаватися від людини до людини. Цей вірус уперше був ідентифікований під час розслідування спалаху в м. Ухань, Китай, у грудні 2019 року.

У людини, інфікованої SARS-CoV-2, розвивається респіраторне захворювання різної тяжкості з такими основними симптомами: гарячка; кашель; задишка (ускладнене дихання).

Симптоми можуть проявитися через 2–14 днів після зараження новим коронавірусом. У багатьох пацієнтів SARS-CoV-2 спричиняє запалення обох легень.

Науковці всього світу працюють над створенням вакцин проти SARS-CoV-2. Водночас, найкращий спосіб запобігти зараженню – уникнути впливу цього вірусу.

Відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 22 липня 2020 р. № 641 «Про встановлення карантину та запровадження посиленних протиепідемічних заходів на території із значним поширенням гострої респіраторної хвороби COVID-19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV-2», рівень епідемічної небезпеки визначають за результатом оцінювання епідемічних показників і затверджують рішенням Державної комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій раз на сім днів.

Рішення про послаблення червоного, помаранчевого та жовтого рівня епідемічної небезпеки не може бути переглянуто раніше ніж через 14 днів з дня визначення такого рівня епідемічної небезпеки.

Жовтий, помаранчевий або червоний рівень епідемічної небезпеки визначають для регіону зі значним поширенням COVID-19, де є хоча б одна з ознак, наведених нижче.

1. Завантаженість ліжок у закладах охорони здоров'я, визначених для госпіталізації пацієнтів з підтвердженим випадком COVID-19, становить більш як 50 % протягом п'яти днів поспіль:

- помаранчевий – завантажено від 50 % до 75 % ліжок;
- червоний – завантажено 75 % і більше ліжок.

2. Середня кількість тестувань методом полімеразної ланцюгової реакції та імуноферментного аналізу менша 24 на 100 000 населення протягом останніх семи днів:

- помаранчевий – п'ять днів поспіль здійснюють менше 24 тестувань на 100 000 населення щоденно.

3. Показник захворюваності на COVID-19 за 14 днів перевищує базовий рівень (40 нових випадків на 100 000 населення):

- зелений – показник захворюваності на COVID-19 менший, ніж базовий;
- якщо показник захворюваності на COVID-19 більший, ніж базовий, то див. табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Співвідношення для визначення показників динаміки

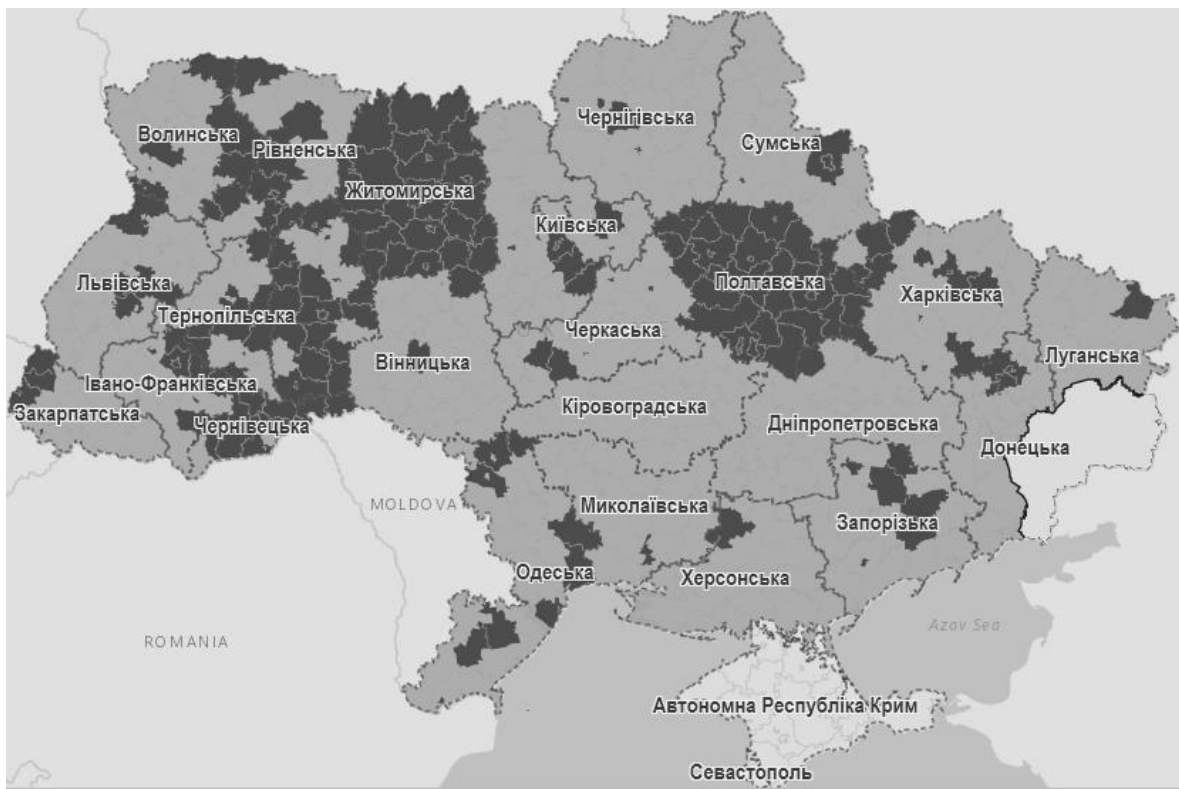
<b>Рівень епідемічної небезпеки</b>	<b>Райони, міста обласного значення з кількістю населення менше 70 000 осіб, обласні центри, м. Київ, м. Севастополь</b>	<b>Райони, міста обласного значення з кількістю населення 70 000 осіб і більше</b>
Жовтий	40–160	40–120
Помаранчевий	> 160	> 120
Червоний	> 240	> 160

Якщо для окремих адміністративно-територіальних одиниць регіону, де мешкає 75 % та більше всього населення регіону, визначено помаранчевий або червоний рівень епідемічної небезпеки, помаранчевий рівень визначають для усього цього регіону загалом.

Червоний рівень епідемічної небезпеки на території окремих адміністративно-територіальних одиниць регіону може бути запроваджено за рішенням Державної комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій (ТЕБ та НС) у разі:

- завантаженості більше 75 % ліжок у закладах охорони здоров'я регіону, визначених керівником робіт з ліквідації наслідків надзвичайної ситуації медико-біологічного характеру державного рівня, пов'язаної з поширенням на території України гострої респіраторної хвороби COVID-19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV-2, для госпіталізації пацієнтів з підтвердженим випадком COVID-19 протягом п'яти днів поспіль;

- перевищення середнього по країні рівня захворюваності на COVID-19 (випадків на 100 000 населення за 14 днів) більш ніж у 5 разів.



**Рисунок 1.14 – Рівні епідемічної небезпеки на територіях, визначені рішенням Державної комісії з ТЕБ та НС від 6 листопада 2020 року № 41, набрало чинності з 00:00 9 листопада 2020 року**  
 (<https://phc.org.ua/news/epidemichna-situaciya-schodo-covid-19-u-regionakh-ukraini>)

*Інфекційні захворювання тварин.* (Епізоотія – широко розповсюджені інфекційні захворювання тварин, що значно перевищують рівень звичайної захворюваності на деякій території). Найбільш поширені на території України такі епізоотичні хвороби, як туберкульоз ВРХ, лейкоз ВРХ, лептоспіроз, сальмонельози, сибірка, сказ, класична чума свиней, хвороба Гамборо, хвороба Марека.

*Хвороби та шкідники рослин.* (Епіфітотія – широко розповсюджені захворювання рослин, що охоплюють район, область або державу). На Україні у посівах зернових культур має місце епіфітотія борошністої роси, бурої листової іржі, фузаріозу, сажкових та інших хвороб, а у степовій зоні відмічався масовий спалах розвитку найнебезпечнішого шкідника озимої пшениці – клопа-черепашки.

Отже, за умови високого ступеня антропогенізації території України, з перевищенням техногенного навантаження на природне середовище у 5–6 разів, порівняно з іншими розвинутими країнами, окремо виділяється група природно-техногенних небезпечних явищ, пов'язаних з експлуатацією гребель, водосховищ, проведенням заходів з меліорації і водопостачання, гірничих видобувних робіт. З іншого боку, завжди є загроза дії стихійних явищ на різні промислові об'єкти, споруди тощо. Руйнування чи пошкодження таких об'єктів з небезпечними виробництвами може призвести до пожеж, вибухів, викидів небезпечних речовин, затоплення територій, радіоактивного забруд-

нення. Стихійні лиха можуть призводити до транспортних аварій, аварій в електроенергетичних спорудах.

### 1.3 Огляд сучасних надзвичайних ситуацій техногенного характеру

Зростання масштабів господарської діяльності й кількості великих промислових комплексів, концентрація на них агрегатів і установок великої та надвеликої потужності, використання у виробництві великих кількостей потенційно небезпечних речовин збільшує вірогідність виникнення техногенних аварій. Надзвичайні ситуації техногенного походження загрожують людині, економіці та природному середовищу або здатні створити загрозу внаслідок імовірного вибуху, пожежі, затоплення або забруднення (зараження) навколишнього середовища.

Надзвичайні ситуації техногенного характеру виникають на хімічно небезпечних об'єктах, радіаційно небезпечних об'єктах, вибухо- та пожежонебезпечних об'єктах, а також гідродинамічно небезпечних об'єктах. Останнім часом значно зросла також небезпека від аварій і катастроф на транспорті.

Надзвичайні ситуації техногенного характеру класифікуються за такими основними ознаками:

- за масштабами наслідків;
- за галузевою ознакою (надзвичайні ситуації у сільському господарстві; у лісовому господарстві; у заповідній території, на об'єктах особливого природоохоронного значення; у водоймах; матеріальних об'єктах – об'єктах інфраструктури, промисловості, транспорту, житлово-комунального господарства та населення – персонал підприємств та установ, мешканці житлових будинків, пасажирів транспортних засобів).

Аварії техногенного характеру класифікуються також з урахуванням масштабу заподіяних чи очікуваних економічних збитків.

#### *Транспортні аварії та катастрофи*

Найбільша кількість надзвичайних ситуацій, особливо із загибеллю людей, припадає на транспорт, що свідчить про високу потенційну небезпечність транспорту як галузі господарства. Щорічно в Україні транспортом загального користування перевозиться понад 900 мільйонів тонн вантажів (в тому числі велика кількість небезпечних), понад 3 мільярди пасажирів. На залізничний транспорт припадає близько 60 % вантажних перевезень, автомобільний – 26 %, річковий і морський – 14 %.

Оскільки транспортом перевозяться 15 % потенційно небезпечних вантажів (вибухонебезпечні, пожежонебезпечні, хімічні та інші речовини), небезпека життю і здоров'ю людей збільшується.

Скоротилося оновлення основних фондів всіх видів транспорту. Ступінь зношення транспортних засобів складає понад 50 %, а на деяких підприємствах і значно більше.

*Залізничний транспорт.* Основними причинами аварій та катастроф на залізничному транспорті є: несправності колій рухомого складу; засобів сигналізації, блокування; помилки диспетчерів; неуважність та недбальство машиністів.

Найчастіше виникають надзвичайні ситуації в разі схлдження рухомого складу з колій, зіткнень, наїздів на перепони на переїздах, при пожежах та вибухах безпосередньо у вагонах. Не виключаються розмиви залізничних колій, обвали, осипи, зсуви, затоплення. Під час перевезення небезпечних вантажів стаються вибухи, пожежі.

За останні роки різко зменшилося оновлення основних фондів залізничного транспорту. Ступінь зношення пасажирських вагонів складає 60 %. Відпрацювали нормативний строк і підлягають списанню 50 % вагонів електро- і 35 % дизельних поїздів. Підлягає заміні більше 20 % залізничних колій, 16 % залізничних колій знаходиться в аварійному стані. Стан технічних засобів не забезпечує повною мірою безпечної експлуатації залізничного транспорту. Серед основних причин виникнення надзвичайних ситуацій доречно відмітити елементарні помилки обслуговуючого персоналу, які призводять до аварій і катастроф.



**Рисунок 1.15 – Під Кам'янцем-Подільським пасажирський поїзд Київ – Кам'янець-Подільський врізався в товарний поїзд і зійшов з рейок, 27 травня 2017 року (<https://www.facenews.ua/news/2017/362225/>)**

Аварійні ситуації під час перевезень залізницею радіоактивних речовин, сильнодіючих отруйних речовин (СДОР) найбільш небезпечні. Такі аварії можуть призвести до небезпечного опромінення людей і радіоактивного забруднення навколишнього середовища, а при виході СДОР у зовнішнє середовище – до гострих отруєнь пасажирів і хімічного зараження повітря, ґрунтів і об'єктів колійного господарства. Складна обстановка може скластися внаслідок аварії в межах залізничної станції.

*Морський та річковий транспорт.* Можливий ризик для безпеки життя людини на морських транспортних засобах значно вищий, ніж на авіаційних

та залізничних видах, але нижчий, ніж на автомобільних. У світовому морському транспорті щорічно зазнають аварії понад 8000 кораблів і гине з них понад 200 одиниць. Безпосередньої небезпеки для життя під час аварії зазнають понад 6000 чоловік, з яких 2000 гине.

Основними причинами загибелі кораблів є посадка на рифи, зіткнення з іншим судном або із палями мостів, перекидання, пожежі, витікання небезпечних речовин, порушення правил експлуатації та безпеки, помилкові дії команди та інше. Складна обстановка може виникнути у випадку швидкоплинності аварійної ситуації, особливо у відкритому морі. Раптове перекидання корабля чи його надмірний крен призводить до того, що пасажери втрачають шанси на спасіння і потрапляють у надзвичайно складну ситуацію.

Зниження рівня безпеки перевезення пасажирів і вантажів на водному транспорті в Україні в останні роки визначалось: збільшенням числа порушень правил водіння суден, технічної експлуатації, зниженням якості ремонту, зупинкою будівництва суден нового покоління. Середній вік суден – 22 роки, а за останні 11 років Чорноморське пароплавство не закупило жодного судна. Зараз десятки морських суден з екіпажами без засобів існування знаходяться в іноземних портах, що може привести до виникнення надзвичайних ситуацій на цих судах.



**Рисунок 1.16 – Самохідна баржа «Олександр Житник» затонула у Каховському водосховищі у 2017 році. На місці аварії утворилася пляма з нафтопродуктів довжиною 6 кілометрів і шириною 50–100 метрів (<https://greenpost.ua/news/posuhy-katastrofy-ta-zbytky-shho-prynese-nam-richkovyj-kanal-gdansk-herson-e40-i22975>)**

*Авіаційний транспорт.* Перевезення пасажирів і вантажів авіаційним транспортом (літаками і вертольотами) набуло величезних масштабів у всіх розвинутих країнах, у тому числі й в Україні. Аварії та катастрофи повітряного транспорту можуть виникати, починаючи з моменту запуску двигунів, під час розбігу по злітно-посадковій смугі, на зльоті, під час польоту і при посадці, аж до вимикання двигунів.

Світова статистика свідчить, що майже половина аварій і катастроф відбувається на льотному полі й половина – в повітрі на різних висотах. Число постраждалих може складати: на літаку АН-2 – 12 людей, на АН-24 – 47 людей, на Як-42 – 113 людей, ТУ-154 – 168 людей, ІЛ-86 – 324 людини.

До важких наслідків призводять руйнування окремих конструкцій літака, відмова двигунів, порушення роботи системи управління, електропостачання, зв'язку, пілотування, нестача палива, перебої життєзабезпечення екіпажу та пасажирів. Найнебезпечнішою трагедією на борту літака є пожежа та вибух.



**Рисунок 1.17 – Авіаційна катастрофа, що сталася біля міста Чугуїв на Харківщині 25 вересня 2020 року.**

Під час планового навчального польоту впав військовий літак Ан-26Ш (б/н 76) 203-ї навчальної авіаційної бригади (в/ч А4104). Унаслідок катастрофи з 27 осіб, що перебували на борту, загинуло 26 людей та вижила 1 особа (<https://glavcom.ua/news/katastrofa-litaka-an-26-uryadova-komisiya-vstanovila-prichini-avariji-713098.html>)

Падіння літака (вертольота) може бути причиною жертв на його борту та на землі, а в разі падіння на житлову забудову може призвести до руйнування виробничих споруд і порушення виробничих процесів. Особливо небезпечно



зпечним є їх падіння на АЕС та об'єкти хімічної промисловості, тому що при цьому можливий вихід у зовнішнє середовище радіоактивних та хімічних речовин або СДОР.

*Дорожньо-транспортні події (ДТП).* Протягом останніх років на дорогах України щорічно стається десятки тисяч автомобільних аварій і катастроф.

Причини дорожньо-транспортних подій – порушення правил дорожнього руху, технічні несправності автомобілів, перевищення швидкості руху, недостатня підготовка осіб, що керують автомобілем, недостатня їх реакція. Часто причиною аварій та катастроф стає управління автомобілем у нетверезому стані. До серйозних дорожньо-транспортних подій призводить невиконання правил перевезення небезпечних вантажів.

Причини дорожніх аварій – незадовільний стан доріг, відкриті люки, необгороджені та неосвітлені ділянки дороги, на котрих виконуються ремонтні роботи, низький технічний стан автомобілів; перевищення швидкості руху, несправність сигналізації на залізничних переїздах, відсутність знаків, які попереджують про небезпеки.



**Рисунок 1.18 – На трасі Київ–Чоп у Львівській області 27 липня 2020 року сталась ДТП. Зіткнулися два легковики і вантажівка. Дівчинка у віці 16 років від отриманих травм загинула. Молодша, 13-річна дівчинка отримала важку черепно-мозкову травму, внаслідок чого впала в кому (<https://ua-reporter.com/news/poyavilis-detali-smertelnogo-dtp-na-trasse-kiev-chop-foto-video>)**

## Радіаційно небезпечні об'єкти (РНО)

До типових РНО відносяться:

- атомні електростанції (АЕС), підприємства з виготовлення ядерного палива, з переробки ядерного палива і поховання радіоактивних відходів;
- науково-дослідні та проєктні організації, які працюють з ядерними реакторами; ядерні енергетичні установки на об'єктах транспорту.

На території України діють 5 атомних електростанцій з 16 енергетичними ядерними реакторами і 2 дослідних ядерних реактори та більше 8 тисяч підприємств і організацій, які використовують у виробництві, науково-дослідній роботі та медичній практиці різноманітні радіоактивні речовини, а також зберігають та переробляють радіоактивні відходи.

Радіаційні аварії – це аварії з викидом (виходом) радіоактивних речовин (радіонуклідів) або іонізуючих випромінювань за межі, не передбачені проєктом для нормальної експлуатації радіаційно небезпечних об'єктів, в кількостях, що перевищують установлені межі їх безпечної експлуатації.

*Атомні електростанції.* Найбільш небезпечними зі всіх аварій на РНО є аварії на атомних електростанціях з викидом радіонуклідів в атмосферу і гідросферу, що призводить до радіоактивного забруднення навколишнього середовища. На території України трансграничним джерелом потенційної небезпеки є аварії з викидом радіоактивних продуктів на АЕС інших держав.

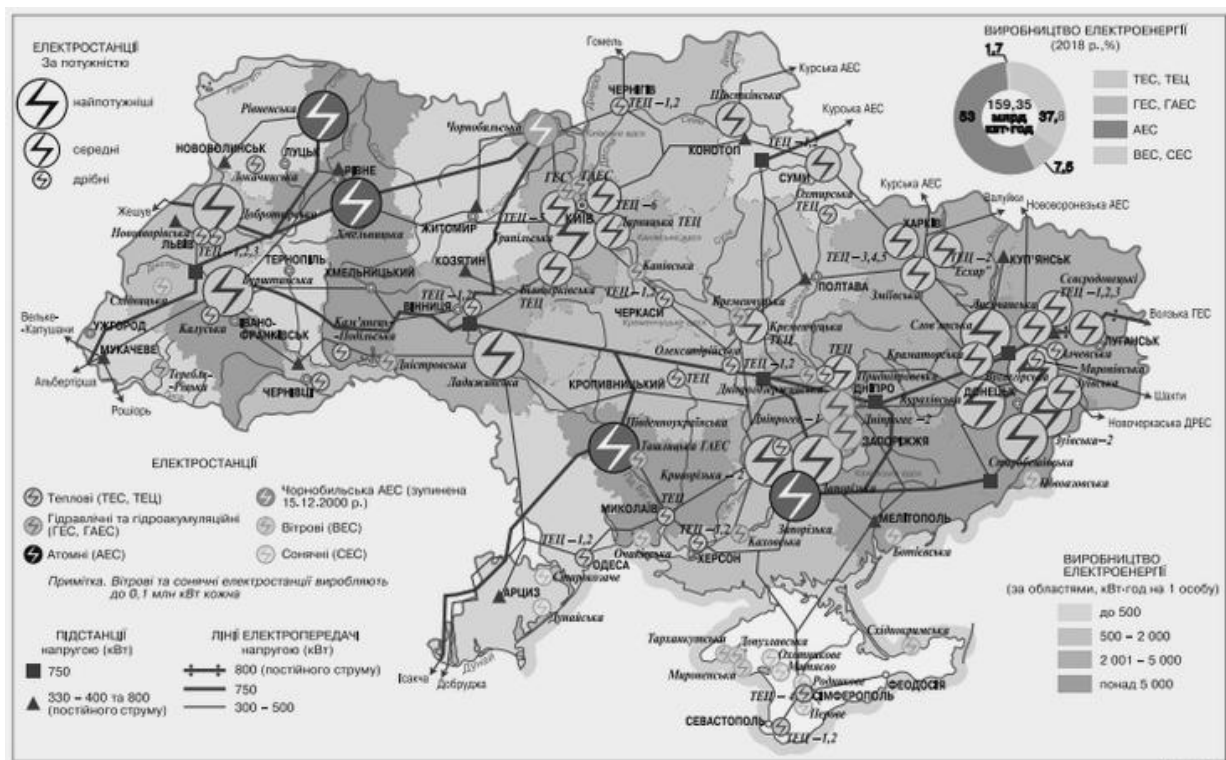


Рисунок 1.19 – Карта об'єктів електроенергетики України

При прогнозуванні та оцінці радіаційної обстановки передбачається два види можливих аварій, в разі виникнення яких створюється небезпечна радіа-

ційна обстановка на місцевості, що потребує здійснення заходів щодо захисту населення, це – гіпотетична аварія та аварія з руйнуванням реактора.

Гіпотетична аварія – аварія, для якої проєктом не передбачаються технічні заходи, що забезпечують безпеку АЕС. У разі викиду радіоактивних речовин в атмосферу виникає небезпечна радіаційна обстановка, що може призвести до опромінення населення.

Аварія з повним руйнуванням ядерного реактора може статися внаслідок стихійного лиха, падіння повітряного транспорту на споруди АЕС, вибуху звичайних боєприпасів тощо. Вона супроводжується руйнуванням трубопроводів з теплоносієм, ушкодженнями реактора і герметичних зон, відмовою систем керування і захисту, що викликає миттєву втрату герметичності конструкцій реактора і викид радіоактивних речовин з потоками пари в навколишнє середовище. Разом з тим можливе розкидання радіоактивних уламків конструкцій паливних елементів.

Наслідки аварій та руйнування об'єктів із ядерними компонентами характеризуються насамперед масштабами радіоактивного забруднення навколишнього середовища і опромінення населення. Вони залежать від геофізичних параметрів атмосфери, що визначають швидкість рознесення викиду; від розміщення людей, тварин, сільськогосподарських угідь, житлових, громадських і виробничих будівель у зоні аварії; від здійснення захисних заходів та ряду інших чинників.

Основними визначальними чинниками радіоактивного забруднення навколишнього середовища та опромінення населення є ізотопний склад, активність і динаміка викиду радіонуклідів в атмосферу. У практиці експлуатації АЕС мали місце численні випадки викиду радіонуклідів за межі станції. Особливо серйозні радіаційні наслідки пов'язані з аварією на Чорнобильській АЕС. Внаслідок вибуху реактора четвертого енергоблока станції сталося часткове руйнування реакторного залу і даху машинного залу. У реакторному залі виникла пожежа. Через пролом у будівлі на територію станції була викинута значна кількість твердих матеріалів: уламків робочих каналів, таблеток двоокису урану, шматків графіту й уламків конструкцій. Утворилася гідроаерозольна хмара з потужною радіаційною дією, яка поширилася на значну відстань.

Тривалий час викидів, проникнення частини аерозолів у нижні шари тропосфери зумовили утворення великих зон радіоактивного забруднення, що вийшли за межі України. Радіоактивне забруднення мало вид локальних плям. Сформувалися значні за площею зони, де були перевищені допустимі рівні забруднення за найбільш радіаційно небезпечними радіонуклідами – плутонієм-239, стронцієм-90 і цезієм-137. Все це призвело до радіоактивного забруднення води і харчових продуктів, особливо молочних, яке у багато разів перевищувало не лише фонові, але й нормативні показники на значній частині території України, країн ближнього і далекого зарубіжжя.

Тому розробку заходів щодо захисту населення в районах розміщення АЕС необхідно здійснювати з урахуванням найважчого варіанта розвитку аварії. В атмосферу може бути викинута до 100 % інертних газів, йоду, цезію

і телуру, 10–30 % стронцію і до 3 % таких радіонуклідів, як рутеній та лантан. Загальна активність викиду в разі виникнення аварії може досягти 10 % загальної активності реактора на момент його зупинки або руйнування.

*Радіоактивні відходи (РАВ).* На території України розташовано понад 8000 різних установ та організацій, діяльність яких призводить до утворення радіоактивних відходів.

Основними джерелами радіоактивних відходів і місцями їх концентрування є:

- АЕС (накопичено 70 000 м<sup>3</sup> РАВ);
- урановидобувна і переробна промисловість (накопичено 65,5 млн тонн РАВ);

- медичні, наукові, промислові та інші підприємства і організації. Виконання робіт щодо збирання, транспортування, переробки і тимчасового зберігання радіоактивних відходів та джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) від усіх цих підприємств та організацій, незалежно від їх відомчої підпорядкованості, здійснює Українське державне об'єднання «Радон» (накопичено 5000 м<sup>3</sup> РАВ);

- зона відчуження Чорнобильської АЕС (понад 1,1 млрд м<sup>3</sup> РАВ);
- підприємства з поховання радіоактивних відходів. Поховання джерел іонізуючого (гамма- та нейтронного) випромінювання має проводитися тільки у спеціалізованих сховищах шляхом безконтейнерного розвантаження джерел, проте в Україні ДІВ ховають здебільшого у захисних контейнерах. Зараз сховища для твердих РАВ заповнені майже повністю або на 80–90 % на більшості спецпідприємств, крім Харківського та Львівського спецкомбінатів.

*Дослідні атомні реактори.* На території України знаходяться 2 дослідницьких реактори, які розташовані у містах Києві та Севастополі. Небезпека від можливої аварії на реакторах загрожує радіоактивним викидом у першу чергу населенню міст, у яких вони розташовані. За архівними даними, на Київському реакторі були аварії у 1968, 1969 і 1970 роках. Тільки у 1968 році в навколишнє середовище було викинуто 40 кюрі радіоактивного йоду, що перевищило допустиму норму в 400 разів. 04.02.1970 р. на реакторі, внаслідок аварії, було опромінено 17 чоловік. Крім того, реактори знаходяться в зоні польотів повітряного транспорту.

Підприємства з видобутку та переробки уранових руд знаходяться у Дніпропетровській, Кіровоградській та Миколаївській областях і належать до виробничого об'єднання «Східний гірничо-збагачувальний комбінат» (ВО СГЗК).

Переробка уранових руд, з метою отримання закису-окису урану, виконується на гідрометалургійному заводі ВО СГЗК, що знаходиться у промзоні міста Жовті Води Дніпропетровської області. Характерним для уранодобування та уранопереробки є те, що майже всі їх відходи являють собою джерела радіоактивного забруднення навколишнього середовища.

Джерела іонізуючого випромінювання у промисловості, медицині, дослідженнях та сільському господарстві.

Україна належить до держав із дуже розвинутим використанням джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) у всіх галузях господарчої та наукової діяльності. Нині в державі існує близько 8000 підприємств та організацій (тільки по місту Києву – близько 400), які використовують більше 100 тисяч ДІВ.

*Хімічно небезпечні виробництва.* Відповідно до Міжнародного Регістру у світі використовується у промисловості, сільському господарстві й побуті близько 6 млн токсичних речовин, 60 тис. з яких виробляються у великих кількостях, в тому числі більше 500 речовин, які відносяться до групи *хімічно небезпечних речовин* (ХНР) – найбільш токсичних для людей. Об'єкти господарювання, на яких використовуються ХНР, є потенційними джерелами техногенної небезпеки. Це так звані *хімічно небезпечні об'єкти*. В разі виникнення аварій та руйнувань цих об'єктів можуть мати місце масові ураження людей, тварин і сільськогосподарських рослин ХНР. До хімічно небезпечних об'єктів (підприємств) відносяться:

- заводи і комбінати хімічних галузей промисловості, а також окремі установки та агрегати, які виробляють або використовують ХНР;
- заводи (або їх комплекси) з переробки нафтопродуктів;
- виробництва інших галузей промисловості, які використовують ХНР;
- підприємства, обладнані холодильними установками, водонапірними станціями та очисними спорудами, де використовують хлор або аміак;
- залізничні станції й порти, де концентрується продукція хімічних виробництв, термінали і склади на кінцевих пунктах переміщення ХНР;
- транспортні засоби, контейнери і наливні поїзди, автоцистерни, річкові та морські танкери, що перевозять хімічні продукти;
- склади і бази, на яких знаходяться запаси речовин для дезинфекції, дератизації сховищ для зерна і продуктів його переробки;
- склади і бази із запасами отрутохімікатів для сільського господарства.

Основними причинами виробничих аварій на хімічно небезпечних об'єктах можуть бути:

- вихід з ладу деталей, вузлів, устаткування, ємностей, трубопроводів;
- несправності у системі контролю параметрів технологічних процесів;
- несправності систем контролю і забезпечення безпеки виробництва;
- порушення герметичності зварних швів і з'єднувальних фланців;
- організаційні помилки та помилки персоналу;
- пошкодження в системі запуску і зупинки технологічного процесу, що може призвести до виникнення вибухонебезпечної обстановки;
- акти саботажу або диверсій з боку виробничого персоналу або сторонніх осіб;
- зовнішня дія сил природи і техногенних систем на обладнання. Існує можливість виникнення аварій внаслідок витікання (викиду) великої кількості хімічно небезпечних речовин. Це може статися внаслідок таких обставин:
  - заповнення резервуарів вище норми через помилки персоналу і відмови систем безпеки, що контролюють рівень;

- пошкодження вагона – цистерни з хімічно небезпечними речовинами або ємностей для їх зберігання внаслідок відмови систем безпеки, що контролюють тиск;
- розриви шлангових з'єднань у системі розвантаження;
- полімеризація хімічно небезпечних речовин у резервуарах для їх зберігання;
- витікання хімічно небезпечних речовин із насосів.



**Рисунок 1.20 – На Львівщині 16 липня 2007 року перекинулося 15 цистерн із жовтим фосфором – отруйною речовиною. Це сталося неподалік Ожидова у Буському районі. 6 цистерн загорілися. У зону ураження потрапили 14 населених пунктів Буського району. Отруїлося 16 осіб, з яких 13 у важкому стані  
([https://zik.ua/news/2007/07/16/hronika\\_fosfornoj\\_katastrofy\\_v\\_ozhydovi1\\_82493](https://zik.ua/news/2007/07/16/hronika_fosfornoj_katastrofy_v_ozhydovi1_82493))**

Головним фактором ураження при аваріях на хімічно небезпечних об'єктах є хімічне зараження місцевості та приземного шару повітря.

Усього в Україні функціонує 1810 об'єктів, на яких зберігається або використовується у виробничій діяльності більше 283 тис. тонн ХНР, у тому числі – 9,8 тис. тонн хлору, 178,4 тис. тонн аміаку.

Ці об'єкти розподіляються за ступенями хімічної небезпеки:

- перший ступінь хімічної небезпеки (у зонах можливого хімічного зараження від кожного з них мешкає більше 75 тис. чол.) – 76 об'єктів;
- другий ступінь хімічної небезпеки (у зонах можливого хімічного зараження від кожного з них мешкає від 40 до 75 тис. чол.) – 60 одиниць;
- третій ступінь хімічної небезпеки (у зонах можливого хімічного зараження від кожного з них мешкає менше 40 тис. чол.) – 1134 одиниць;
- четвертий ступінь хімічної небезпеки (зона можливого хімічного зараження від кожного не виходить за межі об'єкта) – 540 одиниць.

Всього у зонах можливого хімічного зараження від цих об'єктів мешкає близько 20 млн чол. (38,5 % населення країни).

Її адміністративно-територіальна одиниця (АТО) має ступінь хімічної безпеки, з них до 1-го ступеня хімічної небезпеки (в зоні хімічного зараження знаходиться понад 50 % мешканців) віднесено 154 АТО, до 2-го ступеня хімічної небезпеки (від 30 до 50 % мешканців) – 47 АТО; до 3-го ступеня (від 10 до 30 %) – 108 АТО.

Крім отруйних, є багато легкозаймистих та вибухонебезпечних хімічних речовин. Внаслідок аварій великі кількості ХНР можуть потрапити в навколишнє середовище, що може бути причиною масових отруєнь працівників і населення. Небезпека ураження людей може виникнути під час ліквідації хімічної зброї, складовою частиною якої є високотоксичні бойові отруйні речовини.

*Пожежо- та вибухонебезпечні об'єкти.* На об'єктах господарської діяльності України діє понад 1200 великих вибухо- та пожежонебезпечних об'єктів, на яких зосереджено понад 13,6 млн тонн твердих і рідких вибухо- та пожежонебезпечних речовин. Вибухи та пожежі можуть статися на об'єктах, які виробляють або зберігають вибухонебезпечні та хімічні речовини в системах і агрегатах під великим тиском, а також на газо-нафтопроводах. У процесі виробництва за певних умов стають небезпечними і легко займаються деревинний, вугільний, торф'яний, алюмінієвий, борошняний та зерновий пил, а також пил бавовни та льону.

Переважна кількість вибухо-, пожежонебезпечних об'єктів розташована в центральних, східних і південних областях країни, де сконцентровані хімічні, нафто- і газопереробні, коксохімічні, металургійні та машинобудівні підприємства, функціонує розгалужена мережа нафто-, газо-, аміакопроводів, експлуатуються нафто-, газопромисли і вугільні шахти. Щорічно на дим та попіл перетворюються цінності на мільярди гривень. Кожної години у вогні гине 1 людина і близько 20 чоловік отримують опіки та травми.

*Газо-, нафто- та продуктопроводи.* На території України протяжність магістральних газопроводів складає більше 35,2 тис. км, магістральних нафтопроводів – 3,9 тис. км. Їх роботу забезпечує 31 компресорна нафтоперекачувальна і 89 компресорних газоперекачувальних станцій. Протяжність продуктопроводів становить 3,3 тис. км.

Аналіз стану основних фондів та технічного обладнання нафто-, газо- і продуктопроводів показує, що існуюча їх мережа виробила свій ресурс і може зумовити підвищену аварійність у цій галузі економіки. При цьому 4,79 тис. км (14 %) лінійної частини магістральних газопроводів відпрацювали свій амортизаційний строк, а 15 тис. км (44 %) мають малонадійні та неякісні антикорозійні покриття з полімерних стрічкових матеріалів, що призводить до інтенсивної корозії металу труб. Щорічно потрібно оновлювати 500 км лінійної частини магістральних газопроводів на рік. Фактичне виконання робіт з капітального ремонту та реконструкції газотранспортної системи майже у 10 разів нижче, ніж потрібно.



**Рисунок 1.21 – В селі Крячки Васильківського району Київської області 8 червня 2015 року почалася пожежа на нафтобазі «БРСМ-Нафта». Загорівся резервуар із паливом об'ємом 800 куб. м (ємністю 650 тонн). Станом на 9 червня 2015 року вогнем були охоплені вже всі резервуари. Крім цього, за час пожежі на нафтобазі під Києвом сталося кілька вибухів цистерн, внаслідок чого загинуло чотири людини, а 14 було травмовано (<https://www.rbc.ua/ukr/news/pozhar-neftebaze-kievom-prichiny-sledstviya-1433937285.html>)**

*Об'єкти комунального господарства.* У комунальному господарстві склалося критичне становище. Сучасний стан водопровідно-каналізаційного господарства (ВКГ) характеризується незадовільним технічним станом споруд, обладнання, недосконалістю структури управління галуззю та нормативно-правової бази щодо забезпечення її надійного та ефективного функціонування.

Четверта частина водопровідних очисних споруд і мереж фактично відпрацювала термін експлуатації, 22 % мереж перебуває в аварійному стані. Закінчився термін експлуатації кожної п'ятої насосної станції та половини насосних агрегатів. Планово-попереджувальний ремонт виконується на 73 %. Кількість аварій на водопровідних мережах України значно перевищує відповідний рівень у країнах Європи. У системах каналізації амортизовані 26 % мереж і 7 % насосних станцій, а також 48 % насосних агрегатів, 46 % з яких потребує заміни. Планово-попереджувальний ремонт виконується лише наполовину. На сьогодні у водойми скидається без попереднього очищення близько 250 м<sup>3</sup>/добу стічних вод. Понад 1250 сільських населених пунктів забезпечується привізною питною водою. Майже половина підземної води подається комунальними водогонами з відхиленням від стандарту: має підви-



щену загальну жорсткість, підвищений вміст сухого залишку, заліза, марганцю, фтору, нітратів і аміачних сполук.



**Рисунок 1.22 – Внаслідок пориву мережі 24 грудня 2018 року без опалення і гарячої води частково залишилися Нemişлянській і Московський райони міста Харкова (<https://kh.depo.ua/rus/kh/u-harkovi-stalasya-avariya-na-teplomerezhi-bez-opalennya-i-garyachoyi-vodi-zalishilisya-dva-rayoni-video-20181224890857>)**

Надходження у водні об'єкти значної кількості небезпечних і отруйних речовин, скидання міських та промислових стічних вод, зливових стоків із забудованих територій, промислових об'єктів та сільськогосподарських угідь, пошкодження на водопровідних та каналізаційних мережах значно погіршують екологічний стан джерел водопостачання. Обмежені технічні можливості очищення питної води і забезпечення нею в достатній кількості населення Автономної Республіки Крим, Дніпропетровської, Донецької, Івано-Франківської, Луганської, Миколаївської, Одеської, Херсонської та ряду інших областей, міста Севастополя призводять до небезпеки виникнення та поширення інфекційних захворювань.

Обстежено технічний стан 344 870 об'єктів комунального господарства. Непридатними для подальшої експлуатації визнано 900 об'єктів, з них 250 об'єктів та 4370 км інженерних мереж перебувають у загрозливому технічному стані. Сьогодні в Україні експлуатуються понад 17000 мостів. Майже всі вони не мають відповідного нагляду, їх стан не контролюється. На шляхах за-

гального користування 34 % мостів збудовано до 1961 року, хоча розрахунковий термін служби не перевищує 30–40 років.

Більше 80 % енергоблоків на теплових електричних станціях України вже відпрацювали свій розрахунковий ресурс, а 18 % перевищили граничний ресурс. Близько 50 тис. км електромереж введено в експлуатацію до 1970 року і вони практично відпрацювали свій ресурс.

В Україні експлуатуються тільки в основних галузях промисловості понад 35 млн тонн несучих металевих конструкцій і понад 259 млн. м<sup>3</sup> залізобетонних конструкцій. Вони сконцентровані на об'єктах базових галузей. Основними причинами, що призводять до аварій будівель та споруд, є: низька якість проектів і виконання робіт, порушення технологічної дисципліни, а також зношеність основних будівельних фондів, залучення в господарське використання значних територій зі складними інженерно-геологічними умовами, наявність на ринку будівельних послуг малокваліфікованих дослідницьких, проектних, будівельних структур, недосконалість нормативної бази, відсутність необхідних законів.

#### *Гідродинамічні аварії*

До гідродинамічних аварій, що стаються в Україні, належать:

- прориви гребель (дамб, шлюзів) з утворенням хвиль прориву та катастрофічних затоплень або з утворенням проривного паводка;
- аварійні спрацювання водосховищ ГЕС у зв'язку із загрозою прориву гідроспоруди.

Переобладнання берегів великих водосховищ надзвичайно інтенсивно відбувались у перші роки після їх заповнення. Найбільших масштабів досягла переробка берегів на Канівському, Кременчуцькому, Дніпровському та на Дніпродзержинському водосховищах. Значна частина берегової лінії захищена інженерними спорудами (по Дніпровському каскаду 611 км або 17 % усієї берегової лінії).

В Україні, за даними Держкомгеології, підтоплено близько 800 тис. га земель, що дорівнює 15 % території. В зону підтоплення потрапляють 240 міст і селищ міського типу, 138 тисяч приватних будинків. Причини цього негативного процесу: втрати води із водонесучих комунікацій, неорганізований поверхневий стік, ліквідація або погіршення фільтраційних властивостей ґрунтів природних дренажних систем (ярів, балок, русел невеликих річок), зменшення випаровування у зв'язку з асфальтуванням.

Однією з найважливіших причин підтоплення земель є гідротехнічне будівництво, яке призвело до перерозподілу річкового стоку та перекриття природних шляхів дренажу ґрунтових вод. Так, система великих водосховищ Дніпровського каскаду зумовила підняття рівня води у Дніпрі від 2 до 12 метрів, внаслідок чого сталося підтоплення величезних площ Придніпров'я. Цим процесом уражено 50 % зони впливу Кременчуцького водосховища.

Основною причиною підтоплення сільськогосподарських угідь стало будівництво зрошувальних мереж при несвоєчасному введенні дренажних споруд. Підтоплення значних територій призводить до таких негативних нас-

лідків, як забруднення підземних вод, підвищення вологості й погіршення санітарного стану територій, засолення та заболочування ґрунтів, вимокання зелених насаджень, зниження урожайності сільгоспугідь, деформація будівель і споруд, виникнення таких процесів, як зсуви, просадки, карст, обвали.



**Рисунок 1.23 – У зв'язку з відлигою у 2017 році на річці Уж утворився сильний та масштабний льодохід. Уламки криги значної товщини та ваги пошкодили частину опори на пішохідному мосту Ужгорода (<https://uzhgorod.net.ua/news/106043>)**

Створення Дніпровського каскаду гідроелектростанцій з великими водосховищами хоча і зменшує небезпеку затоплення територій під час повеней, проте створює небезпеку катастрофічного затоплення у разі прориву дамб цих водосховищ. Виникнення катастрофічних затоплень на території країни можливе внаслідок руйнування гребель, дамб, водопропускних споруд на 12 гідровузлах та 16 водосховищах річок Дніпро, Дністер, Південний Буг, Сіверський Донець. В Україні побудовано близько 1 тис. водосховищ об'ємом більше 1 млн куб. м і площею водного дзеркала близько 1 млн га та 24 тис. ставків.

Катастрофічне затоплення місцевості може виникнути внаслідок руйнування значних гідротехнічних споруд. Найбільш небезпечними в цьому відношенні є Дніпровський, Дністровський та Південно-Бузький каскади гідроспоруд. Наприклад, у разі руйнування гребель на всіх гідроспорудах Дніпровського каскаду територія катастрофічного затоплення складає близько 700

тис. га з населенням майже 1,5 млн чоловік. Може бути виведено з ладу 270 промислових підприємств, 14 електростанцій, 2000 км ліній електропередач, численні мережі та споруди газового та водного постачання багатьох міст.

Суттєва активізація зсувів, обвалів відбувається у зв'язку з експлуатацією Дніпровського каскаду гідроелектростанцій. Активізація абразії та ерозії ґрунтів відзначається в районах гідротехнічних споруд на узбережжях Чорного та Азовського морів, у випадку проведення робіт зі зміни русел річок тощо.



Рисунок 1.24 – У Київському районі міста Одеса 14 липня 2019 року між центральним пляжем та пансіонатом «Борей» стався зсув ґрунту зі схилу на узбережжя на площі близько 150 м кв. (<https://www.5.ua/regiony/v-odesi-zi-skhylyu-stavsia-masshtabnyi-zsuv-gruntu-shcho-vidomo-195663.html>)

Таким чином, техногенні аварії та катастрофи зумовлюють надзвичайні ситуації зі значними соціально-екологічними та економічними збитками. Виникає необхідність захисту людей від дії шкідливих та небезпечних факторів, проведення рятувальних, невідкладних медичних та евакуаційних заходів, а також ліквідації негативних наслідків.

### **Контрольні питання та завдання**

1. Розкрийте поняття «надзвичайна ситуація».
2. Вкажіть основні етапи алгоритму класифікації надзвичайної ситуації.
3. Розкрийте основні причини виникнення надзвичайних ситуацій в Україні.

4. Надайте класифікацію надзвичайних ситуацій за причинами виникнення.
5. Розкрийте поняття «надзвичайна ситуація техногенного характеру».
6. Розкрийте поняття «надзвичайна ситуація природного характеру».
7. Розкрийте поняття «надзвичайна ситуація соціального характеру».
8. Розкрийте поняття «надзвичайна ситуація воєнного характеру».
9. Надайте класифікацію надзвичайних ситуацій природного характеру.
10. Надайте класифікацію надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОГНОЗУВАННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

### 2.1 Основи прогнозування. Загальні положення

У загальному вигляді під прогнозуванням розуміють процес наукових досліджень якісного і кількісного характеру, направлений на з'ясування тенденцій розвитку явищ, а також пошук оптимальних шляхів досягнення цілей цього розвитку.

*Завдання прогнозу* – дати об'єктивне, достовірне уявлення про те, що буде за тих або інших умов. Для вирішення цього завдання розробляється пошуковий прогноз, завданням якого є показати, яким чином буде розвиватись об'єкт за умови незмінного характеру зовнішнього впливу. В результаті з'явиться відповідь на питання: «що буде», якщо не вживати ніяких регулюючих дій. Таким чином, пошуковий прогноз визначає сфери, що вимагають пріоритетного втручання для подолання небажаних процесів.

Прогнозування не зводиться лише до пасивної ролі передбачення того, що може статися в майбутньому, розробляються і цільові прогнози, які визначають цілі, поставлені державою перед ДСНС України, і можливі шляхи їх досягнення.

При цьому в рівній мірі небезпечно як приземляти цілі, посиляючись на дефіцит ресурсів, так і ставити нереальні цілі, яким би необхідним не було їх досягнення. Окрім цього, необхідно враховувати існування суперечностей між довго- і короткостроковими цілями. Віддання переваги сьогоденним вигодам, як правило, ускладнює рух у стратегічному напрямі. Тому необхідна наявність певного балансу між ними.

Прогнозування застосовується на передплановій стадії розробки управлінських рішень і сприяє виробленню концепції розвитку на перспективу.

Прогнозування тісно пов'язане з плануванням і є необхідною передумовою планових розрахунків.

Одне з важливих завдань прогнозування – прогноз так званих критичних величин процесів розвитку, виявлення можливих термінів крупних зрушень, що знаменують якісну зміну процесів, що вивчаються. Наприклад, у прогнозуванні рівня пожежної безпеки підґрунтям таких зрушень може стати поява і розповсюдження якісно нових способів та засобів попередження і ліквідації надзвичайних ситуацій.

У процесі прогнозування використовуються наступні два підходи.

Суть першого – прогнозувати, починаючи від моменту складання прогнозу, поступово використовуючи ретроспективні дані процесу дослідження визначати можливий стан об'єкта дослідження в майбутньому.

Суть другого – визначити майбутні цілі та орієнтири, а вже від них поступово рухатися до сьогодення.

У першому випадку маємо пошукове (генетичне) прогнозування, у другому – нормативно-цільове прогнозування. З подовженням періоду прогнозуван-

ня, як правило, нормативний його характер посилюється, оскільки на розвиток у більш віддалені терміни менше впливають умови, що склалися на сьогодні.

Прогнозування спирається на математико-статистичний інструментарій і використання обчислювальної техніки. Мета прогнозування полягає у створенні наукових передумов, що включають науковий аналіз тенденцій розвитку процесів і явищ, варіантне передбачення майбутнього розвитку сил і засобів ДСНС, який враховує як тенденції, що склалися, так і намічені цілі, для ухвалення управлінського рішення.

Залежно від мети прогнозування *прогнози поділяються на:*

– *пізнавальні* – опис можливих або бажаних перспектив, станів, майбутнього;

– *управлінські* – які передбачають використання інформації про майбутнє під час ухвалення рішень.

Процес розробки прогнозів ґрунтується на наукових методах пізнання соціально-економічних явищ і використанні сукупності методів, засобів та способів науки прогностики.

За часом випередження прогнози підрозділяються на:

– наддовгострокові (період випередження – понад 20 років);

– довгострокові (період випередження – від 5 до 20 років);

– середньострокові (період випередження – від 1 року до 5 років);

– короткострокові (період випередження – від 1 місяця до 1 року);

– оперативні (період випередження – до одного місяця).

Під періодом випередження розуміється відрізок часу від моменту, для якого є останні статистичні дані про об'єкт прогнозування, до моменту, до якого стосується прогноз.

Розробка прогнозу – це пошук можливого реалістичного розвитку об'єкта або явища. Будь-який прогноз має варіанти розвитку з певним ступенем вірогідності й містить дані, необхідні для розробки та ухвалення обґрунтованих управлінських рішень.

Прогнозування базується на певних принципах (рис. 2.1).

*Принцип системності* – передбачає розгляд об'єкта в його зв'язку і залежності з іншими процесами та явищами, дослідження кількісних і якісних закономірностей, побудову такого логічного ланцюга дослідження, згідно якого процес вироблення й обґрунтування будь-якого рішення відштовхується від визначення загальної мети системи і підпорядкування досягненню цієї мети діяльності всіх вхідних у неї підсистем.

*Принцип наукової обґрунтованості* – базується на: урахуванні вимог об'єктивних законів, застосуванні наукового інструментарію, вивченні досягнень вітчизняного і зарубіжного досвіду формування прогнозів, використанні методик та моделей як умови наукового формування системи прогнозів, їх обґрунтованості, дієвості й своєчасності.

*Принцип цілеспрямованості* – передбачає цілеспрямований характер прогнозування, тобто зміст прогнозу не треба зводити тільки до передбачення, а включати і цілі, яких бажано досягти.

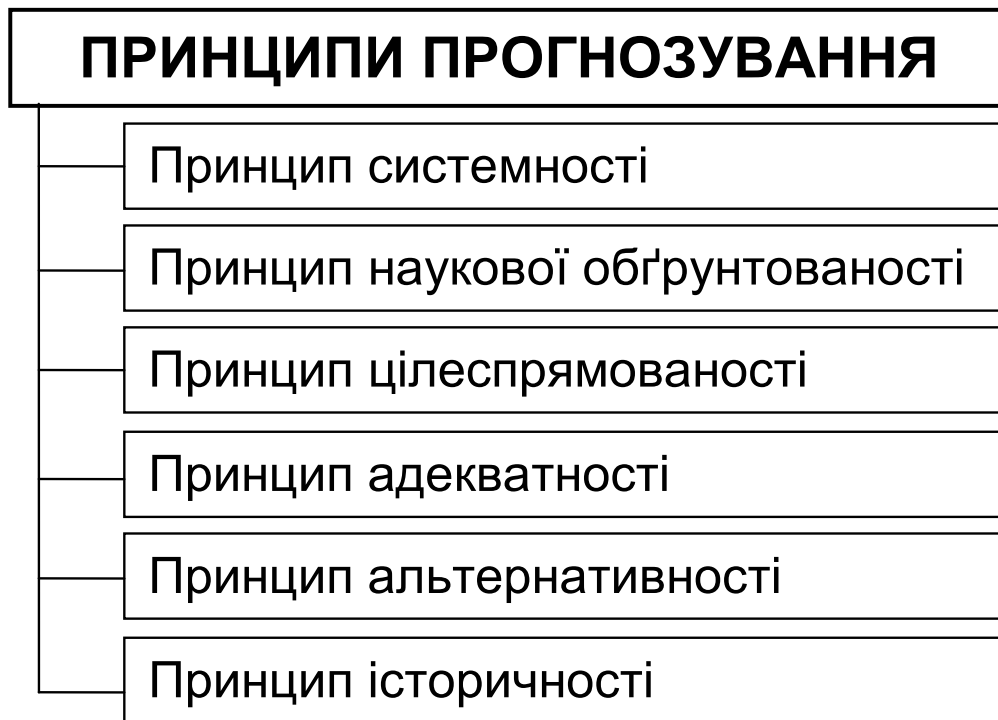


Рисунок 2.1 – Принципи прогнозування

*Принцип адекватності прогнозу об'єктивним закономірностям* – характеризує не тільки процес виявлення тенденцій розвитку, але й оцінку стійкості тенденцій і взаємозв'язків, а також створення теоретичного аналога реальних процесів.

Реалізація принципу адекватності передбачає врахування імовірнісного характеру процесів. Це означає необхідність оцінки як домінуючих тенденцій, так і відхилень, що склалися, визначення можливої області їх розбіжності, а також оцінку ймовірності їх реалізації в майбутньому.

*Принцип альтернативності* – передбачає вибір варіантів розвитку в різних траєкторіях, при різних взаємозв'язках і структурних співвідношеннях. Перехід від імітації процесів і тенденцій, що склалися, до передбачення їх майбутнього розвитку, що базується на побудові альтернатив, тобто визначення декількох можливих, а часто і протилежних, взаємовиключних шляхів розвитку.

*Принцип історичності* – полягає у розгляді прогнозованих явищ і процесів у взаємозв'язку їх історичних форм. Іншими словами, у процесі прогнозування необхідно виходити з того, що стан досліджуваного об'єкта є закономірним результатом його попереднього розвитку, а майбутнє – закономірним результатом його розвитку у минулому і сьогоденні.

Основними завданнями прогнозування є:

- накопичення наукового матеріалу для обґрунтованого вибору прогнозних рішень;
- оцінка стану об'єкта прогнозування;



- науковий аналіз тенденцій розвитку;
- дослідження об'єктивних взаємозв'язків процесів і явищ у конкретних умовах місця і часу;
- виявлення альтернатив еволюції об'єкта прогнозування;
- вибір і обґрунтування варіанта прогнозу.

*Оцінка стану об'єкта прогнозування* базується на поєднанні імовірнісного і детермінованого підходів.

Суть імовірнісного підходу базується на визнанні неможливості в соціально-економічних системах отримати абсолютно точні відомості про всі процеси, які в даний момент відбуваються, а тим більше в деталях передбачити майбутнє.

Детермінований підхід базується на визнанні соціально-економічної системи не імовірнісною, а детермінованою. Це означає, що кожне рішення викликає чітко певний результат. Випадковими діями, не передбаченими заздалегідь, при цьому нехтують. Цей підхід припускає спрощення реальної дійсності, що носить насправді імовірнісний характер. За абсолютного детермінізму зникає можливість альтернативного вибору рішень. За абсолютної невизначеності конкретне представлення майбутнього не можливе, і в цих випадках прогнозування втрачає сенс.

*Науковий аналіз прогнозів* здійснюється у три стадії: ретроспекція, діагноз та проспекція.

Під *ретроспекцією* розуміють етап прогнозування, на якому досліджується історія розвитку об'єкта для отримання його систематизованого опису. На цій стадії здійснюється збір і обробка інформації, оптимізація складу джерел, уточнення й остаточне формування структури і складу характеристик об'єкта прогнозування.

*Діагноз* – етап прогнозування, на якому досліджується систематизований опис об'єкта прогнозування, з метою виявлення тенденції його розвитку і вибору моделей, методів прогнозування. На стадії діагнозу проводиться аналіз об'єкта прогнозування. Аналіз закінчується вибором і обґрунтуванням моделі, а також методу прогнозування.

*Проспекція* – етап прогнозування, на якому за даними діагнозу розробляються прогнози майбутнього розвитку об'єкта і проводиться оцінка достовірності, точності, обґрунтованості прогнозу. На стадії проспекції виявляється недостатність інформації про об'єкт прогнозування, уточнюється раніше отримана інформація, вносяться корективи в модель прогнозованого об'єкта відповідно до інформації, що знов надійшла.

*Дослідження об'єктивних зв'язків процесів і явищ* здійснюється у процесі розробки механізму використання об'єктивних законів, істотних причинно-наслідкових зв'язків явищ, що виражають їх повторюваність у певних умовах, та є віддзеркаленням. При прогнозуванні необхідно враховувати невизначеність, обумовлену стохастичною природою явищ, неповнотою їх пізнання, наявністю суб'єктивного чинника при ухваленні планових рішень, недосконалістю і недостатньою надійністю інформації.

*Виявлення об'єктивних альтернатив* досліджуваного процесу і тенденцій його розвитку на перспективу припускає необхідність вибору між взаємовиключними можливостями.

*Вибір і обґрунтування варіанта прогнозу* здійснюється на основі генетичного (дослідницького, пошукового) і нормативного (цільового) підходу.

При генетичному підході визначається можливий стан об'єкта прогнозування в перспективі, з урахуванням збереження існуючих тенденцій розвитку цього об'єкта. При цьому не враховуються умови, які можуть змінити ці тенденції.

При нормативному підході визначається можливий стан об'єкта, виходячи з висунутих рекомендацій щодо бажаної поведінки об'єкта. Обидва підходи пов'язані між собою, взаємно доповнюють один одного і, як правило, використовуються в сукупності, забезпечуючи комплексне вивчення прогнозованого явища або процесу.

Прогнозування є складним процесом діяльності в рамках підготовки та обґрунтування управлінського рішення, яке потребує ретельного наукового підходу, з урахуванням специфіки методології прогнозування.

## **2.2 Методи прогнозування та їх класифікація**

Під *методами прогнозування* розуміють сукупність прийомів і способів мислення, що дозволяють на основі аналізу зовнішніх і внутрішніх зв'язків об'єкта прогнозування розробити прогноз, з певною мірою достовірності, щодо майбутнього розвитку об'єкта.

Вся сукупність методів прогнозування групується за наступними ознаками:

- за способом отримання й обробки інформації розрізняють:
  - а) статистичні методи;
  - б) методи аналогій;
  - в) випереджальні методи;
- за ступенем формалізації методи розподіляються на:
  - д) формалізовані;
  - е) інтуїтивні.

*Статистичні методи* – система прийомів, способів обробки інформації, направлених на отримання кількісних закономірностей, що виявляються у структурі, динаміці та взаємозв'язках прогнозованих масових соціально-економічних явищ.

*Методи аналогій* – отримання прогнозів, побудованих на логічному зв'язку та схожості закономірностей розвитку одних процесів з іншими, що дозволяє після дослідження робити висновки, хоча і не остаточні, й не доказові в повному розумінні цього слова.

*Випереджальні методи прогнозування* базуються на певних принципах спеціальної обробки науково-технічної інформації, що дозволяє реалізувати у

прогнозі її властивість відображати нові тенденції та закономірності розвитку об'єкта прогнозування.

У свою чергу їх можна розділити на методи дослідження динаміки розвитку об'єкта і методи дослідження й оцінки рівня розвитку об'єкта.

*Інтуїтивні методи прогнозування* – це методи вирішення складних проблем, що не формалізуються, за допомогою отримання прогнозних оцінок стану розвитку об'єкта в майбутньому, незалежно від інформаційної забезпеченості, методом експертних оцінок. На рис. 2.2 представлено класифікаційну схему методів прогнозування.

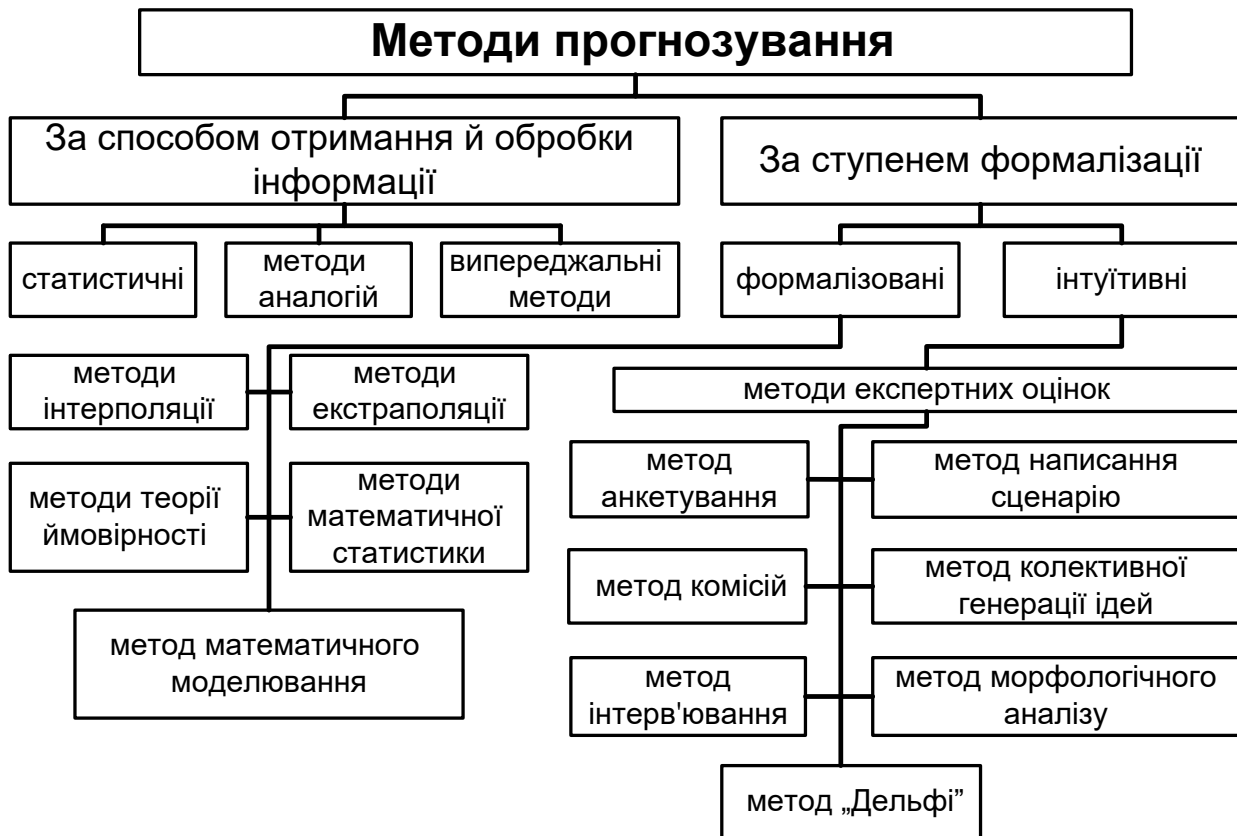


Рисунок 2.2 – Класифікація методів прогнозування

Треба також підкреслити, що представлена класифікація не є вичерпною і може змінюватись разом із розвитком науки прогностики.

### 2.2.1 Формалізовані методи прогнозування

*Формалізовані методи прогнозування* базуються на побудові прогнозів формальними засобами математичної теорії, які дозволяють підвищити достовірність і точність прогнозів, значно скоротити терміни їх виконання, полегшити обробку інформації та оцінку результатів.

До складу формалізованих методів прогнозування входять [1, 5]: методи інтерполяції та екстраполяції, метод математичного моделювання, методи теорії ймовірності та математичної статистики.

*Методи інтерполяції та екстраполяції*

Сутність методу інтерполяції полягає у знаходженні прогнозних значень функцій об'єкта  $y_i = f(x_i)$ , де  $i = 0 \dots n$ , у точках усередині відрізка  $x_0 \dots x_n$  за відомими значеннями параметрів у точках  $x_0 < x < x_n$ .

Основними умовами, що висуваються до функцій при інтерполяції, є:

- функція повинна бути безперервною й аналітичною;
- функція повинна бути достатньою мірою гладкою, тобто вона має володіти достатнім числом не дуже швидко зростаючих похідних.

У прогнозуванні найчастіше застосовуються інтерполяційні формули Лагранжа, Ньютона, Стірлінга, Беселя.

*Метод екстраполяції* – це метод наукового дослідження, що полягає в застосуванні тенденцій, встановлених у минулому, у майбутньому.

Математичні методи екстраполяції зводяться до визначення того, яких значень набудатиме та або інша змінна величина  $Y = F(x)$ , якщо відомий ряд її значень у попередні моменти часу  $y_{(1..n)} = f(x_1) \dots f(x_n)$ .

У вузькому розумінні слова *екстраполяція* – це знаходження за рядом ретроспективних даних функціональної залежності інших її значень, що знаходяться поза цим рядом. Екстраполяція полягає у вивченні стійких тенденцій розвитку явища, що склалися у минулому і сьогодні, й перенесенні їх на майбутнє. У прогнозуванні екстраполяція застосовується при вивченні рядів динаміки і є знаходженням значень функції за межами області її визначення з використанням інформації про поведінку даної функції в деяких точках, що належать області її визначення.

Розрізняють *перспективну* і *ретроспективну* екстраполяцію.

*Перспективна екстраполяція* припускає продовження рівнів ряду динаміки на майбутнє на основі виявленої закономірності зміни рівнів у відрізок часу, що вивчається.

*Ретроспективна екстраполяція* характеризується продовженням рівнів ряду динаміки в минуле.

Існує *формальна* і *прогнозна екстраполяція*.

*Формальна екстраполяція* базується на припущенні збереження в майбутньому минулих і сучасних тенденцій розвитку об'єкта. Прогнозна екстраполяція пов'язує фактичний стан досліджуваного об'єкта з гіпотезою про динаміку його розвитку. Вона припускає необхідність урахування в перспективі альтернативних змін самого об'єкта, його суті.

При розробці прогнозів за допомогою екстраполяції виходять з тенденцій зміни тих або інших кількісних статистичних характеристик об'єкта. Екстраполюються функціональні, системні та структурні характеристики. Ступінь реальності таких прогнозів значною мірою зумовлюється обґрунтованістю вибору меж екстраполяції й відповідністю вибраних показників суті даного явища або процесу.

Послідовність дій при статистичному аналізі тенденцій та екстраполяції полягає в наступному:

1. Формулювання завдання, висування гіпотез про можливий розвиток прогнозованого об'єкта, обговорення чинників, які стимулюють або перешкоджають розвитку об'єкта, визначення екстраполяції та її допустимої дальності.

2. Вибір системи параметрів, уніфікація різних одиниць вимірювання, що відносяться до кожного параметра окремо.

3. Збір і систематизація даних, перевірка однорідності даних та їх порівнянність.

4. Виявлення тенденцій зміни величин статистичного аналізу і безпосередньої екстраполяції даних, що вивчаються.

В екстраполяційних прогнозах прогноз конкретних кількісних показників об'єкта, що вивчається, або параметрів не є основним результатом. Важливішим є своєчасне виявлення зрушень закономірних тенденцій розвитку явища або процесу, що об'єктивно намічаються. Під тенденцією розвитку розуміють деякий його загальний напрям, довготривалу еволюцію. Зазвичай тенденцію прагнуть представити у вигляді більш-менш гладкої траєкторії. Для підвищення точності екстраполяції тренд явища, що екстраполюється, коректується з урахуванням досвіду функціонування об'єкта – аналога досліджень або об'єкта, що випереджає у своєму розвитку прогнозований об'єкт. Залежно від того, які принципи і які початкові дані покладені в основу прогнозу, можуть застосовуватись наступні методи екстраполяції: середнього абсолютного приросту, середнього темпу зростання і екстраполяція на основі вирівнювання рядів за якою-небудь аналітичною формулою.

*Прогнозування за середнім абсолютним приростом* може бути виконане в тому випадку, якщо є упевненість в тому, що загальна тенденція є лінійною, тобто метод базується на припущенні про рівномірну зміну рівня (під рівномірністю розуміється стабільність абсолютних приростів). Для знаходження аналітичного виразу тенденції на будь-яку дату визначається середній абсолютний приріст і послідовно додається до останнього рівня ряду стільки разів, на скільки періодів екстраполюється ряд.

Аналітичний вираз цього методу виглядає таким чином:

$$y_{i+t} = y_i + \Delta t, \quad (2.1)$$

де  $y_{i+t}$  – рівень, що екстраполюється;  $(i+t)$  – номер рівня (роки);  $\Delta$  – середній абсолютний приріст;  $i$  – номер останнього рівня досліджуваного періоду, за який розраховано  $\Delta$ ;  $t$  – термін прогнозу (період випередження).

*Прогнозування за середнім темпом зростання* можна здійснювати у разі, коли є підстава вважати, що загальна тенденція ряду характеризується показовою (експоненціальною) кривою. Для знаходження тенденції в цьому випадку необхідно визначити середній коефіцієнт зростання, зведений у ступінь, відповідний періоду екстраполяції, тобто за формулою:

$$Y_{i+t} = Y_i \cdot K_p^t, \quad (2.2)$$

де  $Y_i$  – останній рівень ряду динаміки;  $t$  – термін прогнозу;  $K_p^t$  – середній коефіцієнт зростання.

Якщо ж ряду динаміки властива інша закономірність, то дані, отримані при екстраполяції на основі середнього темпу зростання, відрізняться від даних, отриманих іншими способами екстраполяції.

Розглянуті методи екстраполяції тренда, будучи простими, в той же час є і найменш адекватними. Тому найбільш поширеним способом є *аналітичний вираз тренда*.

*Тренд явища* – це тривала тенденція зміни показників явища або процесу, тобто зміна, що визначає загальний напрям розвитку, основну тенденцію зміни рівнів ряду ретроспективних даних. Тренд характеризує основні закономірності руху в часі, в деякій мірі вільні від випадкових коливань.

Розробка прогнозу полягає у визначенні виду екстраполяційної функції на основі вихідних ретроспективних даних і параметрів. Першим етапом є вибір оптимального виду функції, що дає якнайкращий опис тренда. Наступним етапом є розрахунок параметрів вибраної екстраполяційної функції.

Основу *екстраполяційних методів прогнозування* складає вивчення рядів динаміки, що є впорядкованими в часі наборами вимірювань тих або інших характеристик досліджуваного об'єкта, процесу.

Найбільш поширеними методами оцінки параметрів залежностей є: метод найменших квадратів та його модифікації, метод експоненціального вирівнювання, метод імовірнісного моделювання і метод адаптивного вирівнювання.

*Метод найменших квадратів* полягає у знаходженні параметрів моделі тренда, що мінімізують її відхилення від точок ретроспективного ряду. Важливим моментом отримання прогнозу за допомогою цього методу є оцінка достовірності отриманого результату.

*Метод експоненціального вирівнювання* є ефективним і надійним методом прогнозування. Основні переваги методу полягають у можливості ранжування важливості початкової інформації, в простоті обчислювальних операцій, у гнучкості опису динаміки процесів. Цей метод дає можливість отримати оцінку параметрів тренда, що характеризують не середній рівень процесу, а тенденцію, що склалася до моменту спостереження. Метод найчастіше застосовується як метод для реалізації середньострокових прогнозів.

*Метод імовірнісного моделювання* базується на методі експоненціального вирівнювання. За достатньої кількості початкової інформації ймовірнісна модель може дати цілком надійний прогноз. Ця модель відрізняється простотою і наочністю. Оцінки, що отримані за допомогою цієї моделі, мають цілком конкретне значення. Недоліком моделі є вимога щодо великої кількості спостережень і вивчення початкового розподілу, що може призвести до помилкових оцінок.

Метод адекватного вирівнювання є узагальненням звичайного експоненціального вирівнювання. За наявності достатньої інформації можна отримати надійний прогноз, на інтервал більший, ніж при звичайному експоненціальному вирівнюванні. Але це лише при дуже довгих рядах, інакше існує ризик отримати недостовірний прогноз. Цим і визначаються можливості його використання в реальній практиці. Пізніше ми розглянемо більш докладно застосування методу найменших квадратів як одного з найбільш поширених методів.

*Метод математичного моделювання* базується на можливості встановлення певної відповідності між знанням про об'єкт пізнання і самим об'єктом. Людські знання про об'єкт є більш-менш адекватним його відображенням, а матеріалізована форма знання є моделлю об'єкта. Таким чином, методом моделювання називається спосіб дослідження, при якому вивчаються не самі об'єкти, а їх моделі, і результати такого дослідження переносяться з моделі на об'єкт.

У прогнозуванні соціально-економічних процесів засобом вивчення їх закономірностей розвитку є математична модель, тобто формалізована система, що описує основні взаємозв'язки її елементів.

Математична модель є математичним описом об'єкта, проведеним у цілях дослідження й управління.

Широкий вибір формалізованих методів дає можливість здійснювати прогнозування, відповідно до заздалегідь встановлених вимог, для широкого спектра задач.

### **2.2.2 Інтуїтивні методи прогнозування**

Суть методу експертних оцінок полягає у проведенні експертами інтуїтивно-логічного аналізу проблеми з кількісною оцінкою думок і формальною обробкою результатів. При цьому узагальнена думка експертів приймається як вирішення проблеми. Використання інтуїції, логічного мислення і кількісних оцінок з формальною обробкою дозволяє отримати ефективне вирішення проблеми. Особливостями методу експертних оцінок є, по-перше, науково обґрунтована організація проведення всіх етапів експертизи, що забезпечує найбільшу ефективність роботи на кожному з етапів; по-друге, застосування кількісних методів як при організації експертизи, так і при оцінці думок експертів та формальній груповій обробці результатів. Найчастіше ці методи використовуються при розгляді соціально-економічних проблем, де неможливо виробити формалізовану прогностичну модель.

*Методи індивідуальних експертних оцінок* включають: методи анкетування й інтерв'ювання, аналітичний метод, метод написання сценарію.

*Метод анкетування* полягає в наданні експертам листів опитування, анкет, на які вони повинні дати відповіді у письмовій формі.

*Інтерв'юванням* є усне опитування експертів членами групи управління інтерв'юерами.

Недоліками інтерв'ю є можливість сильного впливу інтерв'юера на відповіді експерта, відсутність часу для глибокого продумування відповідей, а також високі вимоги до того, хто опитує, і великий час, що витрачається на опитування всього складу експертів.

Отримання прогнозних оцінок аналітичним методом здійснюється за допомогою логічного аналізу якої-небудь прогнозованої ситуації. Він припускає самостійну роботу експерта над аналізом тенденції, оцінкою стану і шляхів розвитку прогнозованого об'єкта.

*Метод написання сценарію* базується на визначенні логіки процесу або явища в часі за різних умов. Основне призначення сценарію – визначення генеральної мети розвитку об'єкта прогнозування, виявлення основних чинників фону і формулювання критеріїв для оцінки верхніх рівнів дерева цілей. Цінність сценарію тим вище, чим менше ступінь невизначеності, тобто чим вище ступінь узгодженості думок експертів у здійсненості подій, в розвитку процесу і так далі.

Основною перевагою розглянутого методу є можливість максимального використання індивідуальних здібностей експертів і відсутність значного психологічного тиску.

*Методи колективних експертних оцінок* – група методів колективних експертних оцінок, що базується на тому, що при колективному мисленні, по-перше, вище точність результату і, по-друге, при обробці індивідуальних незалежних оцінок, що виносяться експертами, можуть виникнути продуктивні ідеї. Існують наступні різновиди методів колективних експертних оцінок: метод «комісій», «метод Дельфі», метод «колективної генерації ідей» («мозкова атака»), метод морфологічного аналізу тощо.

*«Метод Дельфі»* – один з найбільш поширених методів експертних оцінок. Його основними особливостями є: анонімність експертів, повна відмова від особистих контактів експертів і колективних обговорень; багатотурова процедура опитування експертів за допомогою їх анкетування; забезпечення експертів інформацією, включаючи й обмін нею між експертами, після кожного туру опитування при збереженні анонімності оцінок, аргументації та критики; обґрунтування відповідей експертів за запитом організаторів.

*Метод морфологічного аналізу* – застосовується при прогнозуванні складних процесів. Цей експертний метод полягає в систематизованому огляді всіх можливих комбінацій розвитку окремих елементів досліджуваної системи. Метод побудований на повних і чітких класифікаціях об'єктів, явищ, властивостей і параметрів системи, що дозволяють будувати й оцінювати можливі сценарії її розвитку в цілому. Цій меті служить прийом систематизованого охоплення інформації з подальшим дослідженням її за методом «морфологічного ящика». Останній будується у вигляді дерева або матриці, в чарунках яких поміщені відповідні характеристики об'єкта. Послідовне з'єднання одного з параметрів першого рівня з одним параметром наступного рівня є одним з можливих станів об'єкта або вирішень проблеми. В результаті ство-



рюється нова інформація про об'єкт, що вивчається, і виробляється оцінка всіх можливих альтернатив його стану.

Інтуїтивні методи прогнозування займають своє почесне місце серед методів прогнозування. Розвиток обчислювальної техніки та успіхи у створенні елементів штучного інтелекту відкривають нові можливості для використання інтуїтивних методів прогнозування.

### 2.2.3 Ряди динаміки

Дуже часто виникає необхідність досліджувати процеси, що динамічно змінюються. Вивчення змін, що відбуваються при цьому, є однією з необхідних умов пізнання закономірностей їх динаміки. Динаміка складних явищ обумовлена взаємодією різноманітних причин та умов. Ретроспективні дані в цьому випадку прийнято представляти у вигляді рядів динаміки.

*Рядами динаміки* називаються статистичні дані, які відображають розвиток явища, що вивчається, у часі.

Основна *мета вивчення динаміки* полягає у виявленні та визначенні закономірностей розвитку в часі. Це досягається за допомогою побудови й аналізу статистичних рядів динаміки.

Кожний ряд динаміки має два основні елементи:

- показники часу –  $t$ ;
- відповідні рівні розвитку явища (процесу) –  $y$ .

Рівні рядів динаміки відображають кількісну оцінку (міру) розвитку в часі явища, що вивчається. Вони можуть виражатися абсолютними, відносними або середніми величинами.

Залежно від характеру явища, що вивчається, рівні рядів динаміки можуть відноситися або до певних дат (моментів) часу, або до окремих періодів. Відповідно до цього ряди динаміки підрозділяються на *моментні* та *інтервальні*.

*Моментні ряди динаміки* відображають стан явищ (процесів), що вивчаються, на певний момент, на певну дату. Прикладом моментного ряду динаміки є інформація про кількість аварійних ситуацій на об'єктах хімічної промисловості у 2015–2021 рр. Особливістю моментного ряду динаміки є те, що в його рівні можуть входити одні й ті самі одиниці сукупності, що вивчається. Інтервальні ряди динаміки відображають підсумки розвитку (функціонування) процесів, що вивчаються, і явищ за окремі періоди (інтервали) часу. Прикладом інтервального ряду динаміки можуть служити дані про виклики підрозділів оперативно-рятувальної служби на ліквідацію аварійних ситуацій на об'єктах хімічної промисловості за 2015–2019 рр.

Особливістю *інтервального ряду динаміки* є те, що кожен його рівень складається з даних за коротші інтервали (субперіоди) часу. Наприклад, підсумовуючи кількість викликів оперативно-рятувальних підрозділів на ліквідацію аварійних ситуацій на об'єктах хімічної промисловості за перші три місяці року, отримують кількість викликів за квартал і так далі. Властивість підсумовування рівнів за послідовні інтервали часу дозволяє отримувати ряди динаміки більш укрупнених періодів.

Статистичне відображення розвитку явища, що вивчається, в часі може бути представлено рядами динаміки з наростаючими підсумками. Їх застосування обумовлене потребами відображення результатів розвитку показників, що вивчаються, не тільки за даний звітний період, але і з урахуванням показників попередніх періодів. Під час складання таких рядів проводиться послідовне підсумовування суміжних рівнів. Цим досягається сумарне узагальнення результату розвитку показника, що вивчається, з початку звітного періоду (місяця, кварталу, року і т. д.).

*За допомогою рядів динаміки вивчення закономірностей розвитку процесів і явищ здійснюється за наступними основними напрямками:*

- 1) характеристика рівнів розвитку явищ і процесів у часі;
- 2) з'ясування динаміки явищ, процесів за допомогою системи статистичних показників;
- 3) виявлення і кількісна оцінка основної тенденції розвитку (тренда);
- 4) вивчення періодичних коливань;
- 5) екстраполяція і прогнозування.

*Основні елементи рядів динаміки*

При вивченні динаміки важливими є не тільки числові значення рівнів, але й їх послідовність. Як правило, часові інтервали між рівнями є однаковими (доба, декада, календарний місяць, квартал, рік). Взяти будь-який інтервал за одиницю, послідовність рівнів можна записати наступним чином:  
 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ .

Залежно від статистичної природи показника, розрізняють динамічні ряди первинні та похідні, ряди абсолютних, середніх і відносних величин. Разом з динамічністю, явищам і процесам властива інерційність: зберігання механізму формування явищ і характеру розвитку (темпи, напрями, коливання). За значної інерційності процесу і незмінності комплексу умов його розвитку правомірно чекати в майбутньому таких само властивостей і характеру розвитку, які були виявлені у минулому.

При вивченні закономірностей розвитку динамічних процесів статистика вирішує ряд завдань: вимірює інтенсивність динаміки, виявляє й описує тенденції, оцінює структурні зрушення, постійність і коливання рядів, виявляє чинники, що справляють вплив на зміни.

*Кожний ряд динаміки теоретично може бути представлений у вигляді складових:*

- тренд – основна тенденція розвитку динамічного ряду (до збільшення або зниження його рівнів);
- циклічні (періодичні) коливання, зокрема сезонні;
- випадкові коливання.

*Вивчення тренда включає два основні етапи:*

- ряд динаміки перевіряється на наявність тренда;
- проводиться вирівнювання ряду і безпосереднє виділення тренда з екстраполяцією отриманих результатів.

*Перевірка на наявність тренда у ряді динаміки* може здійснюватись за декількома критеріями: метода середніх, фазочастотний критерій знаків першої різниці (Валліса і Мура), критерій Кокса і Стюарта, метод серій.

Безпосереднє виділення тренда може бути проведене трьома методами: укрупнення інтервалів, ковзаючої середньої, аналітичного вирівнювання.

Необхідною умовою для аналізу будь-якого динамічного ряду є порівнянність його статистичних даних. Непорівнянність даних може бути зумовлена різними причинами: змінами в методології обліку і розрахунку показника, зокрема використання різних одиниць вимірювання; змінами у структурі сукупності, різними критичними моментами реєстрації даних або тривалістю періодів, до яких вони відносяться та ін.

*Метод середніх.* Ряд динаміки, що вивчається, розбивається на декілька інтервалів (зазвичай на два), для кожного з яких визначається середня величина ( $y_1, y_2$ ). Висувається гіпотеза про істотну відмінність середніх. Якщо ця гіпотеза приймається, то визнається наявність тренда.

*Фазочастотний критерій знаків першої різниці (Валліса і Мура).* Суть його полягає в наступному: наявність тренда в динамічному ряду приймається в тому випадку, якщо цей ряд не містить або містить у прийнятній кількості фази – зміни знаку різниці першого порядку (абсолютного ланцюгового приросту).

*Критерій Кокса і Стюарта.* Весь ряд динаміки, що аналізується, розбивають на три рівні за числом рівнів групи (в тому випадку, якщо кількість рівнів ряду динаміки не ділиться на три, недостатні рівні потрібно додати) і порівнюють між собою рівні першої й останньої груп.

*Метод серій.* За цим методом кожен конкретний рівень ряду вважається таким, що належить до одного з двох типів: наприклад, якщо рівень ряду менше медіанного значення, то вважається, що він має тип А, інакше – тип В. Тепер послідовність рівнів ряду виступає як послідовність типів. У послідовності типів, що утворилися, визначається число серій.

Серією називається будь-яка послідовність елементів однакового типу, що граничить з елементами іншого типу. Якщо в ряді загальна тенденція до зростання або зниження відсутня, то кількість серій є випадковою величиною, розподіленою приблизно за нормальним законом.

*Безпосередньо виділення тренда може бути проведене трьома методами:*

1. *Укрупнення інтервалів.* Ряд динаміки поділяють на деяку достатньо велику кількість рівних інтервалів. Якщо середні рівні за інтервалами не дозволяють побачити тенденцію розвитку явища, переходять до розрахунку рівнів за більші проміжки часу, збільшуючи довжину кожного інтервалу (одночасно зменшується кількість інтервалів).

2. *Метод ковзаючої середньої.* У цьому методі початкові рівні ряду замінюються середніми величинами, які отримують з даного рівня і декількох, що симетрично його оточують. Ціле число рівнів, за якими розраховується

середнє значення, називають інтервалом вирівнювання. Інтервал може бути непарним (3, 5, 7 і так далі) або парним (2, 4, 6 ...).

При непарному вирівнюванні отримане середнє арифметичне значення закріплюють за серединою розрахункового інтервалу; при парному цього робити не можна. Тому при обробці ряду парними інтервалами їх штучно роблять непарними, для чого утворюють найближчий більший непарний інтервал, але з крайніх його рівнів беруть тільки 50 %. Недолік методики вирівнювання ковзаючими середніми полягає в умовності визначення вирівнюваних рівнів для значень на початку і кінці ряду.

3. *Аналітичне вирівнювання.* Під цим розуміють визначення основної тенденції розвитку явища в часі. У результаті вирівнювання ряду отримують найбільш загальний, сумарний результат дії всіх причинних чинників. Метою аналітичного вирівнювання динамічного ряду є визначення аналітичної або графічної залежності  $f(t)$ .

На практиці за наявним рядом задають вид і знаходять параметри функції  $f(t)$ , а потім аналізують поведінку відхилень від тенденції.

*Основні й додаткові показники рядів динаміки.*

При вивченні явища в часі перед дослідником постає проблема опису інтенсивності змін і розрахунку середніх показників динаміки. Вирішується вона шляхом визначення відповідних показників:

- абсолютного приросту;
- коефіцієнта зростання;
- темпу зростання;
- коефіцієнта приросту;
- темпу приросту.

У разі, коли порівняння проводиться з одним і тим самим періодом (моментом) часу (найчастіше початковим у ряді динаміки), отримують базисні показники.

Якщо ж порівняння проводиться з попереднім періодом або моментом часу, то говорять про ланцюгові показники. У табл. 2.1 представлено співвідношення для визначення показників динаміки.

Між ланцюговими і базисними темпами зростання існує чітко визначений зв'язок: множення відповідних ланцюгових темпів зростання дорівнює базисному останнього періоду; відношення двох базисних темпів зростання наступного і попереднього періодів є ланцюговий темп зростання наступного періоду. Знаючи базисні темпи зростання, можна обчислити ланцюгові діленням кожного наступного темпу зростання на кожний попередній.

*Система середніх показників динаміки включає:* середній рівень ряду, середній абсолютний приріст, середній темп зростання.

*Середній рівень ряду* – це показник, узагальнюючий підсумок розвитку явища за одиничний інтервал або момент наявної часової послідовності.

Розрахунок середнього рівня ряду динаміки визначається видом цього ряду і величиною інтервалу, відповідного кожному рівню.

Таблиця 2.1

Показник	Базисний	Ланцюговий
Абсолютний приріст $\Pi_{i\text{ баз}}; \Pi_{i\text{ лан}}; \left(\Pi_{i\text{ баз}} = \sum \Pi_{i\text{ лан}}\right)$	$y_i - y_0$	$y_i - y_{i-1}$
Коефіцієнт зростання ( $K_p$ ) $K_{p\text{ баз}} = \Pi K_{p\text{ лан}}$	$y_i / y_0$	$y_i / y_{i-1}$
Темп зростання ( $T_p$ )	$(y_i / y_0) \times 100$	$(y_i / y_{i-1}) \times 100$
Коефіцієнт приросту ( $K_{np}$ )	$K_p - 1;$ $(y_i - y_0) / y_0;$ $\Pi_{i\text{ баз}} / y_0$	$K_p - 1;$ $(y_i - y_{i-1}) / y_{i-1};$ $\Pi_{i\text{ лан}} / y_{i-1}$
Темп приросту ( $T_{np}$ )	$K_{np} \times 100;$	$K_{np} \times 100$

Для інтервальних рядів з рівними періодами часу середній рівень  $\bar{y}$  розраховується таким чином:

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i. \quad (2.3)$$

Якщо в інтервальному ряді відрізки мають нерівну тривалість, то середній рівень розраховується за формулою середньої арифметичної зваженої:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n t_i}. \quad (2.4)$$

Середній абсолютний приріст розраховується за наступною формулою:

$$\bar{\Pi} = \bar{\Pi}_{i\text{ баз}} : n. \quad (2.5)$$

Середній темп зростання дорівнює:

$$\bar{T}_p = \bar{K}_p \times 100, \quad (2.6)$$

де  $\bar{K}_p$  – середній коефіцієнт зростання, розрахований як

$$\bar{K}_p = \sqrt[n]{\Pi \bar{K}_{p\text{ лан}}} = \sqrt[n]{\bar{K}_{p\text{ баз}}}. \quad (2.7)$$

### 2.2.4 Метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів для випадку лінійної функції однієї змінної було розроблено К. Гауссом в 1794–1795 роках.

Завжди можна підібрати функцію  $y = f(x)$ , яка для кожного значення  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) давала б значення, достатньо близькі до відповідних заданим значенням  $y_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) (рис. 2.3).

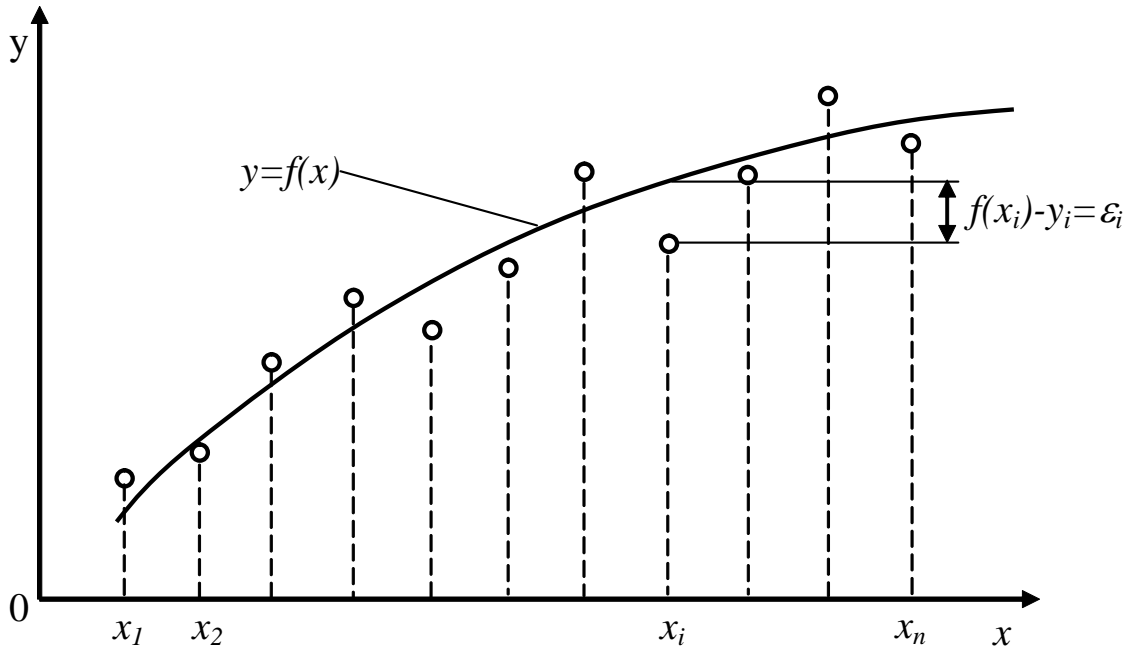


Рисунок 2.3 – Статистичні дані розвитку явища

Перепишемо рівняння  $y = f(x)$ , підставивши замість  $x$  та  $y$  значення, які нам відомі ( $x_1, y_1; \dots, x_n, y_n$ ), та отримаємо наступні рівняння:

$$\left. \begin{array}{l} f(x_1) - y_1 = \epsilon_1 \\ f(x_2) - y_2 = \epsilon_2 \\ \dots\dots\dots \\ f(x_n) - y_n = \epsilon_n \end{array} \right\} \quad (2.8)$$

Числа  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$  будемо називати відхиленнями.

Найбільш точною вважається формула  $y = f(x)$ , для якої сума квадратів відхилень буде мати найменше значення, ніж у інших функцій.

$$\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2 = \epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \dots + \epsilon_n^2 \Rightarrow \min.$$

Розглянемо у загальному виді процес визначення параметрів емпіричної формули за способом найменших квадратів. Нехай підібрано емпіричну формулу виду

$$y = f(x, a_1, \dots, a_m), \quad (2.9)$$

де  $x$  – незалежна змінна;  $a_1, \dots, a_m$  – параметри (постійні коефіцієнти, що входять у формулу), які потрібно визначити.

Запишемо рівняння  $y = f(x, a_1 \dots a_m)$  наступним чином:  $f(x, a_1 \dots a_m) - y = 0$ ; підставляючи в ліву частину рівняння відомі значення  $x_i$  та  $y_i$ , отримаємо наступну систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} f(x_1, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m) - y_1 &= \varepsilon_1 \\ f(x_2, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m) - y_2 &= \varepsilon_2 \\ \dots\dots\dots \\ f(x_n, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m) - y_n &= \varepsilon_n \end{aligned} \right\}. \quad (2.10)$$

Відповідно до способу найменших квадратів підберемо такі значення параметрів  $a_1 \dots a_m$ , щоб сума квадратів відхилень була мінімальною. Складемо суму квадратів відхилень:

$$U = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[ f(x_i, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m) - y_i \right]^2 = \left[ f(x_1, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m) - y_1 \right]^2 + \\ + \left[ f(x_2, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m) - y_2 \right]^2 + \dots + \left[ f(x_n, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m) - y_n \right]^2$$

Оскільки змінні  $x_1, y_1 \dots x_n, y_n$  є числами постійними, то параметри  $a_1 \dots a_m$ , що входять у рівняння (2.8)

$$U = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2, \quad (2.11)$$

слід розглядати як невідомі величини, які необхідно визначити. Таким чином, представлене рівняння ми можемо розглядати як функцію  $m$  незалежних змінних  $a_1 \dots a_m$ :

$$U = f(x_i, \hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_m). \quad (2.12)$$

Необхідно визначити, за яких  $a_1 \dots a_m$  функція  $U$  має мінімальне значення, для чого необхідно дослідити її на екстремум. З курсу математичного аналізу відомо, що функція, яка може бути продиференційована, має екстремум в точках, в яких всі частинні похідні першого порядку дорівнюють нулю. Для функції  $U$  необхідні умови мінімуму мають наступний вид:

$$\frac{\partial U}{\partial a_1} = 0, \frac{\partial U}{\partial a_2} = 0, \dots, \frac{\partial U}{\partial a_m} = 0.$$

Розв'язання системи рівнянь (2.8) дозволить визначити параметри  $a_1 \dots a_m$ :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial U}{\partial a_1} = 0 \\ \frac{\partial U}{\partial a_2} = 0 \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial U}{\partial a_m} = 0 \end{array} \right\}. \quad (2.13)$$

Використання процедури оцінки, що базується на методі найменших квадратів, вимагає обов'язкового задоволення цілого ряду передумов, невиконання яких може призвести до значних помилок.

Випадкові помилки мають нульову середню, кінцеві дисперсії.

Кожне вимірювання випадкової похибки характеризується нульовим середнім, не залежним від значень спостережуваних змінних.

Дисперсії кожної випадкової помилки є однаковими, їх величини не залежні від значень спостережуваних змінних.

Значення похибок різних спостережень незалежні одна від одної.

Випадкові помилки мають нормальний розподіл.

Значення ендогенної змінної  $x$  є вільними від помилок вимірювання і мають кінцеві середні значення і дисперсії.

У практичних дослідженнях як модель тренда в основному використовують наступні функції:

– лінійну

$$y = ax + b; \quad (2.14)$$

– квадратичну



$$y = ax^2 + bx + c; \quad (2.15)$$

– степеневу

$$y = x^n; \quad (2.16)$$

– показову

$$y = a^x; \quad (2.17)$$

– експоненціальну

$$y = ae^x; \quad (2.18)$$

– логістичну

$$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}. \quad (2.19)$$

Вибір моделі у кожному конкретному випадку здійснюється за цілим рядом статистичних критеріїв, наприклад за дисперсією, кореляційним відношенням та ін.

Слід зазначити, що названі критерії є критеріями апроксимації, а не прогнозу. Проте, зважаючи на прийняту гіпотезу про стійкість процесу в майбутньому, можна припускати, що в цих умовах модель, найбільш вдала для апроксимації, буде якнайкращою і для прогнозу.

У ряді випадків для вибору виду функціональної залежності використовують прийом, що базується на тому, що певні співвідношення між змінами вхідної і вихідної величини припускають ту або іншу функціональну залежність.

Дійсно, якщо виконується умова  $\Delta y / \Delta x \approx const$ , приймається лінійна модель  $y = ax + b$ , де  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти, що визначаються за методом найменших квадратів;  $\Delta y$ ,  $\Delta x$  – прирости залежної і незалежної змінних, тобто  $\Delta y = y_t - y_{t-1}$ ;  $\Delta x = x_t - x_{t-1}$ .

Якщо  $\Delta \ln y / \Delta x = const$ , то приймається модель  $y = ax^b$ ; якщо  $\Delta \ln y / \Delta \ln x \approx const$ , то  $y = av^x$ ; у разі  $\Delta y^2 / \Delta x^2 \approx const$ , то  $y = ax^2 + vx + c$ ; у випадку  $\left( \frac{\Delta x}{\Delta y} \right) / \Delta x \approx const$ , то  $y = \frac{x}{a + vx}$ .

Аналогічні співвідношення можна визначити і для інших залежностей.

Розглянемо приклад лінійної екстраполяції.

Нехай статистичні дані розподілені так, як це показано на рис. 2.4.

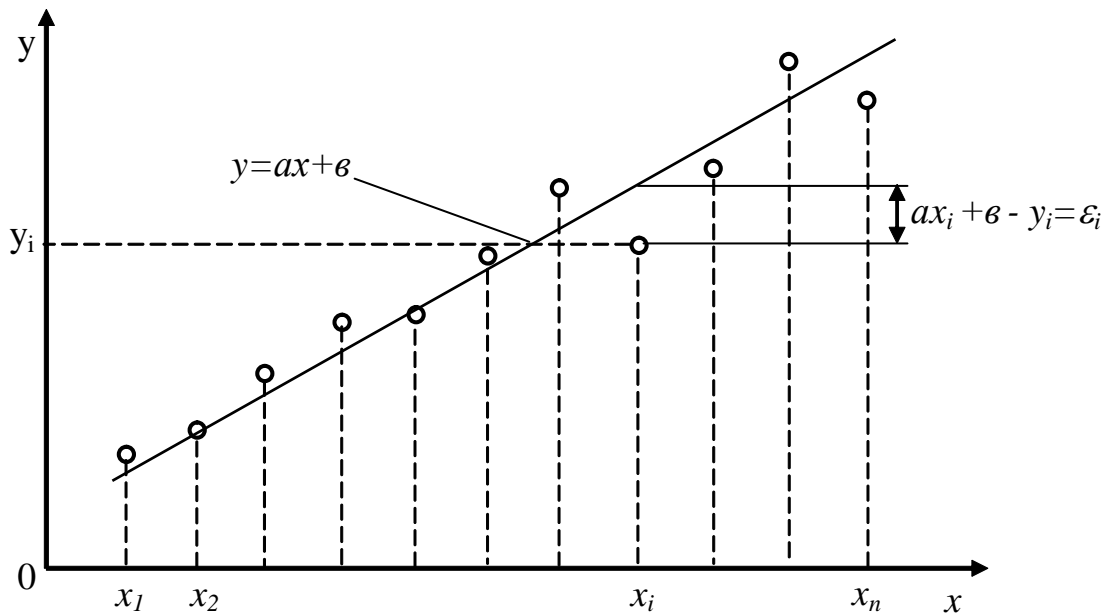


Рисунок 2.4 – Графік розподілення статистичних даних

Визначимо параметри  $a$  та  $b$  функції  $y = ax + b$ . Для цього випишемо  $n$  відхилень наступним чином:

$$\left. \begin{array}{l} ax_1 + b - y_1 = \varepsilon_1 \\ ax_2 + b - y_2 = \varepsilon_2 \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ ax_n + b - y_n = \varepsilon_n \end{array} \right\}. \quad (2.20)$$

Відповідно до методу найменших квадратів параметри  $a$  та  $b$  функції  $y = ax + b$  повинні бути вибрані такими, щоб сума квадратів відхилень була мінімальною:

$$U = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 \Rightarrow \min. \quad (2.21)$$

Відповідно це рівняння розпишемо наступним чином:

$$U = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n [ax_i + b - y_i]^2 = [ax_1 + b - y_1]^2 + [ax_2 + b - y_2]^2 + \dots + [ax_n + b - y_n]^2. \quad (2.22)$$

Знайдемо частинні похідні від отриманої функції  $U$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial a} &= 2[ax_1 + \epsilon - y_1] \cdot x_1 + 2[ax_2 + \epsilon - y_2] \cdot x_2 + \dots \\ &\dots + 2[ax_n + \epsilon - y_n] \cdot x_n; \end{aligned} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \epsilon} = 2[ax_1 + \epsilon - y_1] + 2[ax_2 + \epsilon - y_2] + \dots + 2[ax_n + \epsilon - y_n].$$

Прирівнявши отримані частинні похідні нулю та поділивши отримані рівняння на 2, отримаємо наступну лінійну систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} [ax_1 + \epsilon - y_1] \cdot x_1 + [ax_2 + \epsilon - y_2] \cdot x_2 + \dots + [ax_n + \epsilon - y_n] \cdot x_n &= 0, \\ [ax_1 + \epsilon - y_1] + [ax_2 + \epsilon - y_2] + \dots + [ax_n + \epsilon - y_n] &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2.24)$$

Виконавши нескладні алгебраїчні перетворення, отримаємо наступну систему нормальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} a \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + \epsilon \cdot \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ a \cdot \sum_{i=1}^n x_i + \epsilon \cdot n &= \sum_{i=1}^n y_i \end{aligned} \right\}. \quad (2.25)$$

Розв'язок системи нормальних рівнянь (2.23) має наступний вигляд:

$$a = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n y_i x_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \quad \epsilon = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i x_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}. \quad (2.26)$$

Важливим моментом отримання прогнозу за допомогою методу найменших квадратів є оцінка достовірності отриманого результату. З цією метою використовується цілий ряд статистичних характеристик:

1. Оцінка стандартної помилки:

$$S_{1.f(x)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2}{n - p}}, \quad (2.27)$$

де  $n$  – число спостережень;  $p$  – число коефіцієнтів, що визначаються в моделі.

2. Середня відносна помилка оцінки:

$$\bar{m}_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y_i - f(x_i)}{y_i} 100\% . \quad (2.28)$$

Наведені критерії (1, 2) показують ступінь наближення моделі до реальних спостережень за процесом. Важливим критерієм оцінки надійності моделі є кореляційне відношення

$$\eta = \sqrt{\frac{1 - S_{1,f(x)}}{S_1^2}} , \quad (2.29)$$

де  $S_1^2$  – повна дисперсія залежної змінної, яка обчислюється за формулою:

$$S_1^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{n-1} , \quad (2.30)$$

де  $\bar{y}$  – середня арифметична залежної змінної, обчислена за емпіричними даними ряду.

Оскільки  $0 < \eta < 1$ , то наближення коефіцієнта множинної кореляції до одиниці дозволяє судити одночасно про надійність моделі й істотність зв'язку між змінними.

Загальну помилку розраховують за наступним рівнянням:

$$S_z = \sqrt{S_{1,f(x)}^2 + \frac{S_{1,f(x)}^2}{n} + \frac{S_{1,f(x)}^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} (x_i - \bar{x})^2} . \quad (2.31)$$

Довірчий інтервал прогнозного значення визначається таким чином:

$$y_i - t_\alpha S_z \leq y_i \leq y_i + t_\alpha S_z , \quad (2.32)$$

де  $t_\alpha$  – значення t-статистики Стюдента;  $y_i$  – оцінка залежної змінної.

Величину  $t_\alpha$  вибирають з таблиць залежно від  $P$  – заданої імовірності здійснення прогнозу та  $\mathcal{G}$  ( $\mathcal{G} = n - m$ , де  $n$  – кількість рівнів ряду динаміки,  $m$  – кількість параметрів рівняння тренда; для лінійного тренда  $m = 2$ ).

## 2.3 Кореляційно-регресійний аналіз

Явища, які у випадку подій масового характеру відрізняються певною закономірністю, проте не виявляються на основі одиничного спостереження, називаються *масовими явищами*. Саме така закономірність називається статистичною закономірністю.

Статистична закономірність спостерігається в тих випадках, коли:

- а) у досліджуваному процесі діє один загальний комплекс причин;
- б) разом із цим, у кожному окремому випадку діють особливі додаткові причини, кожного разу інші.

При цьому самі причини, які визначають масові процеси, прийнято ділити на дві категорії:

- основні причини, які діють у всіх випадках;
- побічні (вторинні) причини, які виявляються тільки в окремих випадках.

Статистична закономірність має місце тоді, коли існує поєднання основних та побічних причин. Основні причини обумовлюють саме існування такої закономірності, а побічні причини визначають її відносну приблизність. Іншими словами, закономірність проявляється тільки в загальній масі випадків, а окремий випадок може відхилитись від загалу.

З наведеного вище стає зрозумілим, що статистичний аналіз виявляється корисним в тих випадках, коли доводиться аналізувати процеси, які при масовому спостереженні здатні проявляти очевидну закономірність. Якби діяли тільки головні причини, без накладення другорядних, то всі окремі випадки були б абсолютно однаковими, і не виникло б потреби аналізувати всю їх масу. Достатньо було б досліджувати один з випадків і на його основі зробити висновки, що відносяться вже до всієї досліджуваної сукупності.

Там, де закономірність пробивається через результати дії побічних причин, доводиться вивчати вже цілу масу випадків, щоб мати можливість виявити закономірність. У такій ситуації дослідження одиничного прикладу може призвести до помилкових висновків.

*У масових процесах зазвичай розрізняють два елементи: систематичний (постійний) і випадковий (побічний). Систематичний елемент є результатом дії основних причин, випадковий елемент – наслідок дії побічних причин (їх поєднання і дія виявляються по-різному в кожному окремому випадку). Статистична закономірність виявляється виразніше у разі дії закону великих чисел. Цей закон відображає закономірності, властиві випадковим подіям масового характеру. При великій кількості спостережень вплив випадкових чинників взаємно врівноважується, і вступають у дію головні причини, які відбиваються в деякій постійності середніх чисел.*

*Для виконання закону великих чисел важливо дотримати певні умови:*

- а) досліджуваний масив повинен бути однорідним, бути однакової якості. Це означає, що всі елементи масиву потрапляють під дію одних і тих же основних причин. Інакше можуть виникнути інші основні чинники, і тоді виявити загальну картину виявиться неможливим.

Однорідність даної статистичної маси не можна встановити на основі статистичного дослідження. Для цього потрібний якісний аналіз, який проводиться методами, що використовуються у відповідних областях науки (фізиці, економіці та ін.);

б) побічні причини, що впливають на різні елементи масиву, повинні бути незалежними або мало залежними один від одного. Таким чином, не може бути коректної статистики там, де немає достатньо:

- багаточисельних;
- однорідних;
- незалежних даних.

Якщо ця умова не дотримана, то відсутня і коректна статистика.

Знання статистики допомагає нам прийняти оптимальні рішення. При цьому статистика зовсім не відкидає досвід та інтуїцію дослідника. Її можна розглядати як один з компонентів процесу прийняття рішення, але зовсім не як весь процес. Тому є підстави вважати, що статистика доповнює, але не замінює ділового досвіду, здорового глузду та інтуїції людини.

Залежність однієї випадкової величини від значень, яких набуває інша випадкова величина (фізична характеристика), у статистиці називається *регресією*. Якщо цій залежності надано аналітичного вигляду, то таку форму уявлення зображають рівнянням регресії.

*Процедура пошуку передбачуваної залежності між різними числовими сукупностями зазвичай включає наступні етапи:*

- встановлення значущості зв'язку між ними;
- можливість представлення цієї залежності у формі математичного виразу (рівняння регресії).

Перший етап у вказаному статистичному аналізі стосується виявлення так званої кореляції, або кореляційної залежності. *Кореляція* розглядається як ознака, що вказує на взаємозв'язок ряду числових послідовностей. Інакше кажучи, кореляція характеризує силу взаємозв'язку в даних. Якщо це стосується взаємозв'язку двох числових масивів  $x_i$  і  $y_i$ , то таку кореляцію називають парною. При пошуку кореляційної залежності зазвичай виявляється ймовірний зв'язок однієї величини  $x$  (для якогось обмеженого діапазону її зміни, наприклад від  $x_1$  до  $x_n$ ) з іншою величиною  $y$ , що також змінюється в деякому інтервалі  $(y_1, y_n)$ . У такому разі ми матимемо справу з двома числовими послідовностями, між якими і належить встановити наявність статистичного (кореляційного) зв'язку. На цьому етапі поки не ставиться завдання визначити, чи є одна з цих випадкових величин функцією, а інша – аргументом. Відшукання кількісної залежності між ними у формі конкретного аналітичного виразу  $y = f(x)$  – це завдання вже іншого аналізу, регресійного.

Таким чином, кореляційний аналіз дозволяє зробити висновок про силу взаємозв'язку між парами даних  $x$  і  $y$ , а регресійний аналіз використовується для прогнозування однієї змінної ( $y$ ) на підставі іншої ( $x$ ).

Іншими словами, в цьому випадку намагаються виявити причинно-наслідковий зв'язок між аналізованими сукупностями.

Прийнято розрізняти *два види зв'язку між числовими сукупностями* – це може бути функціональна залежність або ж статистична (випадкова). За наявності функціонального зв'язку кожному значенню чинника, що впливає (аргументу), відповідає певна величина іншого показника (функції), тобто зміна результативної ознаки цілком обумовлена дією факторної ознаки.

Аналітично функціональна залежність подається в наступному вигляді:  
 $y = f(x)$ .

У разі статистичного зв'язку значенню одного чинника відповідає деяке наближене значення досліджуваного параметра, його точна величина є непередбачуваною, непрогнозованою, тому отримувані показники виявляються випадковими величинами. Це означає, що зміна результативної ознаки  $y$  обумовлена впливом факторної ознаки  $x$  лише частково, оскільки можлива дія й інших чинників, внесок яких позначений як:  $y = f(x) + \varepsilon$ .

За своїм характером кореляційні зв'язки – це співвідносні зв'язки.

Для кількісної оцінки існування зв'язку між сукупностями випадкових величин, що вивчаються, використовується спеціальний статистичний показник – коефіцієнт кореляції  $r$ .

Якщо передбачається, що цей зв'язок можна описати лінійним рівнянням типу  $y = a + bx$  (де  $a$  і  $b$  – константи), то прийнято говорити про існування лінійної кореляції.

Коефіцієнт  $r$  – це безрозмірна величина, вона може змінюватися від 0 до  $\pm 1$ . Чим ближче значення коефіцієнта до одиниці (неважливо, з яким знаком), тим з більшою упевненістю можна стверджувати, що між двома даними сукупностями змінних існує лінійний зв'язок. Іншими словами, значення однієї з цих випадкових величин ( $y$ ) істотним чином залежить від того, якого значення набуває інша ( $x$ ). Випадок, коли  $r = 1$ , свідчить про те, що має місце класичний випадок власне функціональної залежності (тобто реалізується ідеальний взаємозв'язок).

Якщо між парами сукупностей є цілком очевидний зв'язок, то, не розглядаючи стадію кореляції, можна відразу приступати до пошуку рівняння регресії.

Якщо ж дослідження стосуються якогось нового процесу, що раніше не вивчався, то наявність зв'язку між сукупностями є предметом спеціального пошуку.

При цьому умовно можна виділити методи, які дозволяють оцінити наявність зв'язку якісно, і методи, що дають кількісні оцінки. Щоб виявити наявність якісного кореляційного зв'язку між двома досліджуваними числовими наборами експериментальних даних, існують різні методи, які прийнято називати *елементарними*.

Ними можуть бути прийоми, основані на наступних операціях:

– паралельному зіставленні рядів;

- побудові кореляційної та групової таблиць;
- графічному зображенні за допомогою поля кореляції.

### 2.3.1 Рівняння регресійної моделі

Нехай існує  $p$  незалежних змінних  $X_1, X_2, \dots, X_p$  і залежна змінна  $Y$ . Оскільки змінна  $Y$  є випадковою величиною, то за заданих значень факторів вона має деякий розподіл. Якщо випадкова величина  $Y$  є неперервною, то можна вважати, що її розподіл при кожному припустимому наборі значень факторів  $(x_1, \dots, x_p)$  має умовну щільність розподілу  $f_{x_1, \dots, x_p}(y)$ . Найчастіше передбачається, що умовний розподіл  $Y$  для кожного припустимого набору значень факторів – нормальний. Пояснювальні змінні  $X_1, X_2, \dots, X_p$  можуть розглядатися як випадкові, так і детерміновані, тобто такі, що набувають певних значень. У класичній прогнозній моделі вони вважаються *детермінованими*.

Пояснена частина  $\hat{y}(X_1, \dots, X_p)$  являє собою функцію від значень факторів. Таким чином, прогнозна модель має вигляд:

$$Y = \hat{y}(X_1, \dots, X_p) + \varepsilon.$$

Найбільш природним вибором поясненої частини випадкової величини  $Y$  є її середнє значення – умовне математичне очікування  $M_X[Y]$ , що визначається при даному наборі пояснювальних змінних. Рівняння  $M_X[Y] = f(x_1, \dots, x_p)$  називається *рівнянням регресії*. У цьому випадку прогнозна модель має вигляд

$$Y = M_X[Y] + \varepsilon, \quad (2.33)$$

де  $\varepsilon$  – випадкова величина, що називається *похибкою* або *помилкою*. Рівняння (2.33) називається *рівнянням регресійної моделі*.

Відзначимо деякі властивості регресійної моделі. Знайдемо математичне очікування від обох частин виразу (2.33):

$$\begin{aligned} M_X[Y] &= M_X[M_X[Y]] + M_X[\varepsilon] \Rightarrow M_X[Y] = M_X[Y] + M_X[\varepsilon] \Rightarrow \\ &\Rightarrow M_X[\varepsilon] = 0. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Отже, у регресійній моделі очікуване значення випадкової помилки дорівнює нулю. Звідси випливає вимога некорельованості випадкових помилок і пояснювальних змінних.



Для того щоб знайти пояснену частину  $\hat{y}(X_1, \dots, X_p) = M_X[Y]$ , необхідно знати умовні розподіли випадкової величини  $Y$ . Але слід зауважити, що на практиці знайти точне значення поясненої частини неможливо.

У таких випадках застосовується стандартна процедура згладжування експериментальних даних. Вона складається із двох етапів:

1) визначається тип функції  $M_X[Y]$  (лінійна, показова і т.д.):

2) знаходять оцінки параметрів цієї функції за допомогою одного з методів математичної статистики.

Формально жодних способів вибору типу функції не існує. Однак у більшості випадків прогнознi моделі є лінійними. Крім простоти, для такого вибору існують дві причини.

По-перше, якщо випадкова величина  $(X, Y)$  має спільний нормальний розподіл, то її рівняння регресії є лінійним. По-друге, лінійна регресійна модель має менший ризик значної помилки прогнозу.

Надалі ми будемо розглядати лінійні регресійні моделі. Найбільш вивченими є такі лінійні регресійні моделі, у яких виконується умова (2.34). Вони називаються *класичними моделями*.

### 2.3.2 Парний регресійний аналіз

Як було показано в п. 2.3.1, задача прогнозу пов'язана з розглядом регресійної моделі  $Y = M_X[Y] + \varepsilon$ . Однак оскільки одержання рівняння регресії  $M_X[Y] = f(x_1, \dots, x_p)$  потребує досить значної вибірки як пояснювальних, так і залежних змінних (що практично неможливо), то намагаються визначити криву або поверхню, яка пов'язує вхідні та вихідні змінні, наближеними методами. Ці методи одержали назву *регресійного аналізу*.

Таким чином, *задачею регресійного аналізу* є встановлення форми залежності між змінними, оцінка функції регресії, прогноз невідомих значень залежної змінної.

Природно, що кількість факторних змінних  $X$  може бути довільною. Чим їх більше, тим складнішим є проведення регресійного аналізу. Тому спочатку розглянемо випадок, коли вхідна змінна або фактор один. У цьому випадку говорять про *парний регресійний аналіз* або *однофакторну модель*.

З курсу математичного аналізу відомо, що в цьому випадку мова йде про функціональну залежність, тобто коли кожному значенню однієї або декількох незалежних змінних (аргументів) ставлять у відповідність одне й тільки одне значення функції.

Необхідно відзначити, що в більшості випадків кожному значенню вхідної або факторної змінної відповідає множина можливих значень залежної змінної. З точки зору математичної статистики, кожному значенню вхідної змінної відповідає певний розподіл результативної змінної. Така залежність одержала назву *статистичної* або *стохастичної*.

Поява статистичного зв'язку пояснюється наявністю в будь-якій задачі прогнозування цілого ряду неврахованих або неконтрольованих факторів, які неминуче приводять до наявності помилок. Тому при розв'язанні задачі прогнозування розглядають усереднення залежної змінної  $Y$  за фактором  $X$ . Інакше кажучи, знаходять умовне математичне очікування  $M_x[Y]$ , тобто математичне очікування результативної змінної  $Y$  за умови, що фактор  $X$  набув конкретного значення  $x$ .

Якщо кожному значенню факторної змінної відповідає умовне математичне очікування залежної змінної, то така статистична залежність називається *кореляційною*.

Оскільки для кожного значення  $X$  умовне математичне очікування  $M_x[Y]$  буде приймати нове значення, тобто буде залежати від величини  $x$ , то, як відомо з математичної статистики, кореляційна залежність може бути представлена у вигляді

$$M_x[Y] = \varphi(x), \quad (2.35)$$

де  $\varphi(x) \neq \text{const}$ .

Рівняння (2.35) називається *модельним рівнянням регресії*, функція  $\varphi(x)$  – *модельною функцією регресії*, а її графік – *модельною лінією регресії*.

Для одержання точного модельного рівняння регресії необхідно для кожного значення параметра  $X$  знати умовний закон розподілу вихідної змінної  $Y$ . На практиці така інформація, як правило, відсутня. Найчастіше дослідник має лише вибірку пар значень  $(x_i, y_i)$  обмеженого об'єму  $n$ . У цьому випадку мова може йти лише про оцінку або наближене значення функції регресії. Такою оцінкою є вибіркова лінія регресії

$$\hat{y} = \hat{\varphi}(x, b_0, b_1, \dots, b_p), \quad (2.36)$$

де  $\hat{y}$  – вибіркова умовна середня результативної змінної  $Y$  за фіксованого значення фактору  $X = x$ ,  $b_0, b_1, \dots, b_p$  – параметри кривої. На відміну від (3.3) рівняння (3.4) називається *вибірковим рівнянням регресії*. Якщо наближене значення функції  $\hat{\varphi}(x, b_0, b_1, \dots, b_p)$  обрано правильно, то зі збільшенням об'єму вибірки воно повинно наближатися до модельної функції регресії  $\varphi(x)$ .

Як приклад розглянемо статистичну залежність, що представлена в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_i$	8	11	12	9	8	8	9	9	8	12
$y_i$	5	10	10	7	5	6	6	5	6	8

Графічна інтерпретація даної залежності наведена на рис. 2.5.

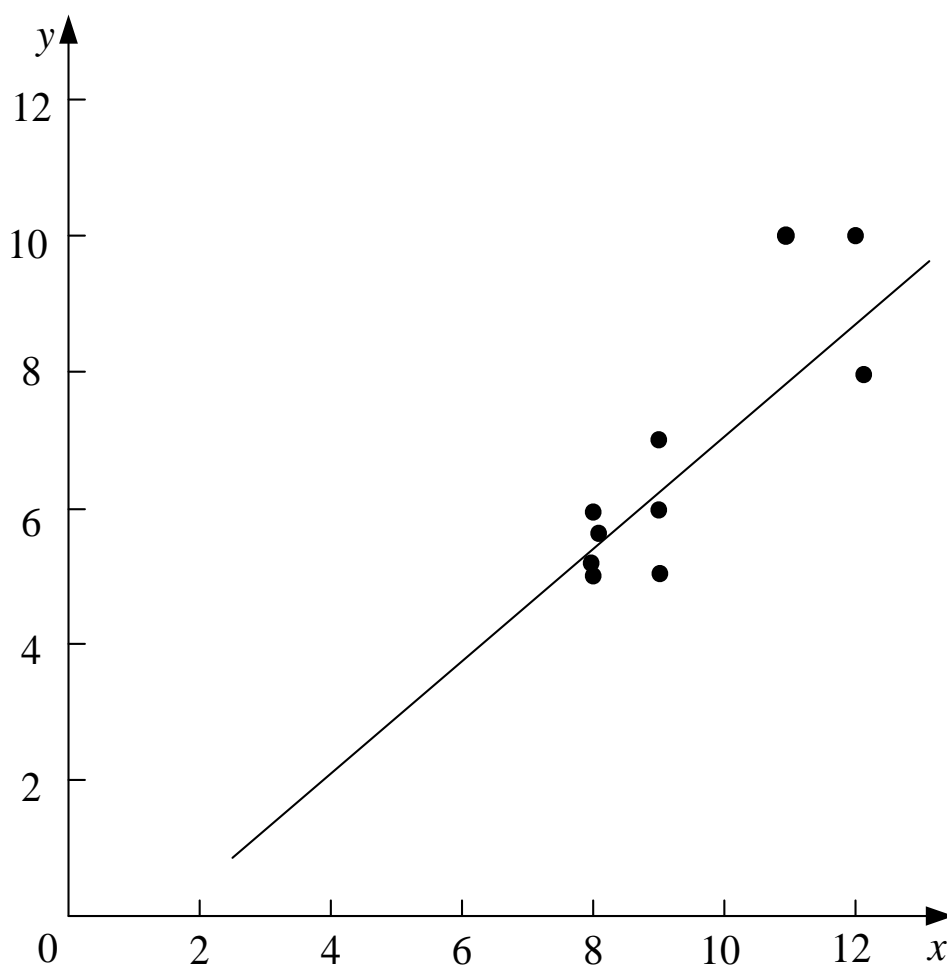


Рисунок 2.5 – Графічна інтерпретація залежності

Точки, що зображають статистичну залежність вихідної змінної від факторів, називаються *полем кореляції*. За розташуванням емпіричних точок можна припустити наявність лінійної кореляційної залежності між змінними  $X$  та  $Y$ . Тому вибіркове рівняння регресії будемо шукати у вигляді лінійного рівняння

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x. \quad (2.37)$$

Оскільки, незалежно від конкретної задачі прогнозування, загальний вид рівняння лінійної регресії є незмінним, то з'ясуємо, яким чином можна знаходити невідомі параметри рівняння  $b_0$  та  $b_1$ .

Найбільш ефективним у цьому випадку є *метод найменших квадратів* (див. п. 2.2.4). Він полягає в тім, що невідомі параметри  $b_0$  та  $b_1$  вибирають таким чином, щоб сума квадратів відхилень емпіричних значень  $y_i$  від значень  $\hat{y}_i$ , знайдених з рівняння регресії (2.37) була мінімальною:

$$S = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i - y_i)^2 \rightarrow \min .$$

Квадрати, так само як і при обчисленні дисперсії, беруться для виключення впливу знака відхилення на результат.

У цьому випадку ми маємо функцію двох змінних  $S = S(b_0, b_1)$ . Як відомо з математичного аналізу, для визначення екстремуму (мінімуму) функції двох змінних необхідно порівняти нулю її обидві часткові похідні:

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial b_0} = 2 \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i - y_i) = 0; \\ \frac{\partial S}{\partial b_1} = 2 \sum_{i=1}^n (b_0 + b_1 x_i - y_i) x_i = 0. \end{cases}$$

Звідси одержуємо алгебраїчну систему нормальних рівнянь для визначення параметрів лінійної регресії:

$$\begin{cases} b_0 n + b_1 \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i; \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n x_i y_i. \end{cases} \quad (2.38)$$

Розділивши обидві частини рівнянь системи (3.6) на  $n$ , одержимо систему нормальних рівнянь у вигляді:

$$\begin{cases} b_0 + b_1 \bar{x} = \bar{y}; \\ b_0 \bar{x} + b_1 \overline{x^2} = \overline{xy}, \end{cases} \quad (2.39)$$

де риска над змінною позначає її середнє вибіркоче значення:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad \overline{x^2} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n}, \quad \overline{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{n}.$$

Підставляючи значення

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}, \quad (2.40)$$

знайдене з першого рівняння системи (2.39), у рівняння регресії (2.40), одержимо  $\hat{y} = \bar{y} - b_1 \bar{x} + b_1 x$  або

$$\hat{y} - \bar{y} = b_1 (x - \bar{x}). \quad (2.41)$$

У виразі (2.41) коефіцієнт  $b_1$  називається *вибірковим коефіцієнтом регресії*  $Y$  по  $X$ . Він показує, на скільки одиниць у середньому зміниться залежна змінна  $Y$  в разі збільшенні фактора  $X$  на одиницю. Значення коефіцієнта  $b_1$  визначається із системи (2.39):

$$b_1 = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2}. \quad (2.42)$$

У виразі (2.42) чисельник дорівнює вибірковому кореляційному моменту змінних  $X$  і  $Y$ , оскільки  $\text{Cov}[X, Y] = M[(X - \bar{x})(Y - \bar{y})] = \overline{xy} - \bar{x}\bar{y}$ , а знаменник – це вибіркова дисперсія фактора  $X$ , оскільки  $D_x = \sigma_x^2 = M[X^2] - (M[X])^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2$ . Таким чином,

$$b_1 = \frac{\text{Cov}[X, Y]}{\sigma_x^2}. \quad (2.43)$$

Відзначимо, що з (2.43) випливає те, що лінія регресії проходить через точку  $(\bar{x}, \bar{y})$ .

Користуючись отриманими результатами, знайдемо рівняння регресії для розглянутої вище задачі (табл. 2.2). Розглянемо спочатку всі вибіркові середні:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = \frac{94}{10} = 9,4,$$

$$\bar{x}^2 = 9,4^2 = 88,36,$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{10} y_i}{10} = \frac{68}{10} = 6,8,$$

$$\overline{x^2} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i^2}{10} = \frac{908}{10} = 90,8,$$

$$\overline{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i y_i}{10} = \frac{664}{10} = 66,4.$$

Звідси одержуємо,  $\text{C\`ov}[X, Y] = 66,4 - 9,4 \cdot 6,8 = 2,48$ ,  
 $\sigma_x^2 = 90,8 - 9,4^2 = 2,44$  і, нарешті,  $b_1 = \frac{2,48}{2,44} = 1,016$ . Таким чином, рівняння регресії  $Y$  по  $X$  має вигляд:

$$\hat{y} - 6,8 = 1,016(x - 9,4) \text{ або } \hat{y} = -2,75 + 1,016x.$$

### 2.3.3 Коефіцієнт кореляції

Розглянемо, яким чином можна оцінювати тісноту кореляційної залежності між  $X$  і  $Y$ . Коефіцієнт регресії  $b_1$  для цієї мети є непридатним. Незважаючи на те, що він показує, на скільки одиниць у середньому зміниться  $Y$  в разі збільшення  $X$  на одну одиницю, у цього коефіцієнта є істотний недолік: він залежить від одиниць виміру.

Тому для оцінки тісноти кореляційної залежності між  $X$  і  $Y$  використовують наступний підхід.

Перетворимо рівняння (2.43) наступним чином:

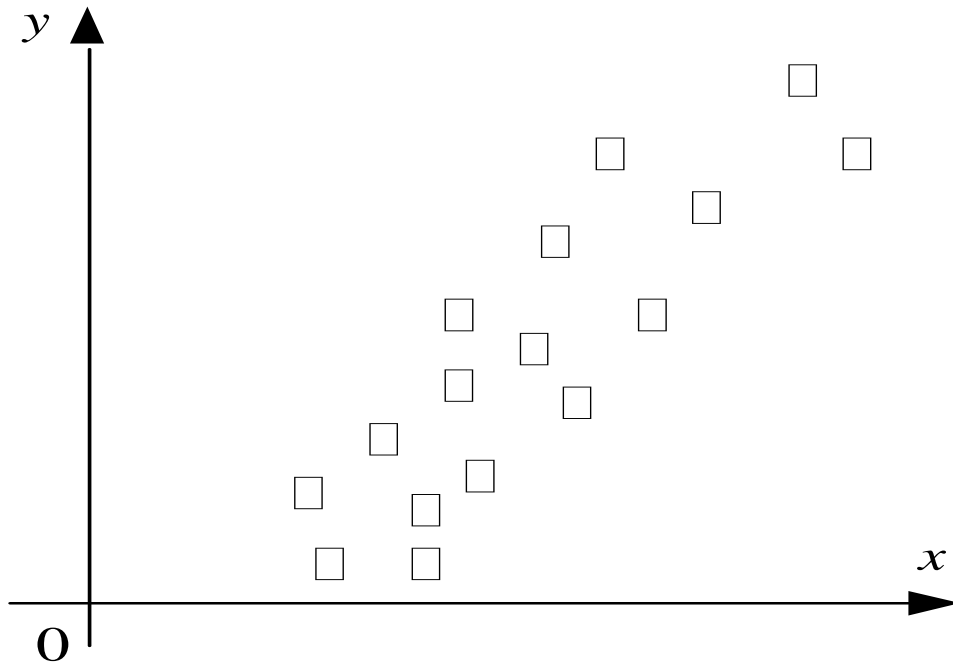
$$\frac{\hat{y} - \bar{y}}{\sigma_y} = b_1 \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \frac{(x - \bar{x})}{\sigma_x}. \quad (2.44)$$

У даному виразі величина

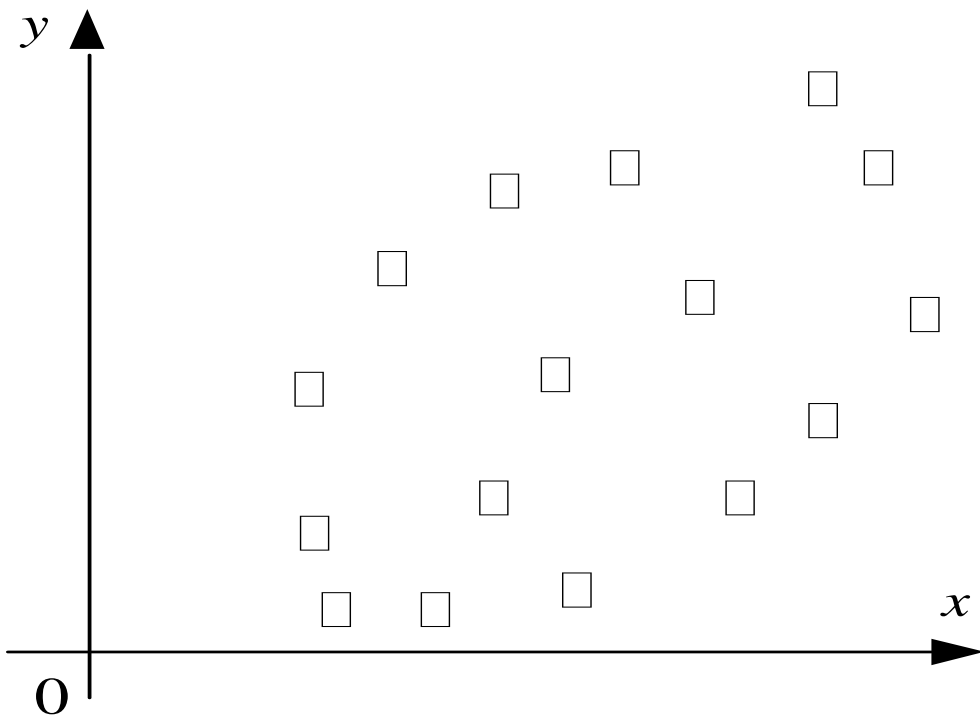
$$r_{xy} = b_1 \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (2.45)$$

показує, на скільки одиниць  $\sigma_y$  зміниться в середньому  $Y$ , якщо  $X$  зміниться на одне  $\sigma_x$ . Величина  $r_{xy}$  є показником тісноти зв'язку між змінними і називається *вибірковим коефіцієнтом кореляції*.

На рис. 2.6, а і б наведено дві кореляційні залежності  $Y$  від  $X$ . Очевидно, що в першому випадку кореляційна залежність є сильнішою і коефіцієнт кореляції більшим. Якщо  $r_{xy} > 0$ , то кореляційний зв'язок є прямим, якщо  $r_{xy} < 0$  – зворотним.



а)



б)

Рисунок 2.6

Використовуючи формулу (2.43) для  $b_1$ , коефіцієнт кореляції можна представити у вигляді:

$$r_{xy} = \frac{\text{Cov}[X, Y]}{\sigma_x \sigma_y}. \quad (2.46)$$

Існують і інші модифікації формули (2.46):

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n \sigma_x \sigma_y} \quad (2.47)$$

або

$$\begin{aligned} r_{xy} &= \frac{\frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{n} - \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right) \left( \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right)}{\sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n} - \left( \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \right)^2 \right) \left( \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} - \left( \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \right)^2 \right)}} = \\ &= \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\left( n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right) \left( n \sum_{i=1}^n y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \right)}}. \quad (2.48) \end{aligned}$$

Формула (2.48) є найбільш зручною для практичних цілей, тому що з її допомогою коефіцієнт  $r_{xy}$  обчислюється безпосередньо з даних спостережень без додаткових обчислень середніх значень змінних величин і відхилень від них.

Коефіцієнт кореляції має наступні властивості:

- 1) коефіцієнт кореляції змінюється в межах  $-1 \leq r_{xy} \leq 1$ ; чим ближче  $|r_{xy}|$  до одиниці, тим тісніший зв'язок;
- 2) при  $r_{xy} = \pm 1$  кореляційний зв'язок являє собою лінійну функціональну залежність;
- 3) при  $r_{xy} = 0$  лінійний кореляційний зв'язок відсутній.



Зокрема у вищенаведеному прикладі (табл. 2.2) коефіцієнт кореляції, обчислений за формулою (2.48), дорівнює  $r_{xy} = 0,866$ . Іншими словами, кореляційний зв'язок у цьому випадку досить тісний, а сама кореляційна функція є близькою до лінійної.

*Перевірка гіпотези про значущість коефіцієнта кореляції*

Згідно зі схемою статистичного доведення виконуємо наступне.

1. Нульова гіпотеза: лінійного зв'язку немає, тоді істинний коефіцієнт кореляції дорівнює нулю:

$$H_0 : \rho(x, y) = 0, \quad (2.49)$$

за двосторонньої альтернативи

$$H_1 : \rho(x, y) \neq 0. \quad (2.50)$$

2. Вибираємо рівень значущості  $\alpha$ , наприклад,  $\alpha = 0,05$ .

3. Обчислюємо спостережуване значення критерію

$$T_C = r_{xy} \frac{\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r_{xy}^2}}, \quad (2.51)$$

де  $n$  – об'єм вибірки.

4. Ця статистика має розподіл Стюдента з  $k = n - 2$  ступенями вільності, а для  $n > 60$  можна використовувати і стандартний закон розподілу.

5. Знаходимо критичні значення статистики, тобто квантілі розподілу Стюдента (чи стандартного для великих вибірок) для заданого рівня значущості  $\alpha$ .

Для  $n \leq 60$  маємо:

$$t_{кр} = t_{кр}(\alpha, k), \quad (2.52)$$

а для  $n > 60$  – наближену формулу

$$t_{кр} = \Psi(\alpha), \quad (2.53)$$

де  $\Psi(\alpha) = \Phi^{-1}(\alpha)$  – обернена функція стандартного закону розподілу.

На практиці для  $n \leq 60$ , за заданого рівня значущості  $\alpha$ , значення  $t_{кр}(\alpha, k)$  знаходять за даними таблиці 2.3.

6. Перевіряємо критерій: якщо  $|T_C| \geq t_{кр}$ , то нульову гіпотезу відхиляємо, тобто існує суттєвий лінійний зв'язок між даними (дані корелюють).

Таблиця 2.3 – Критичні точки розподілу Стьюдента

$k$	Рівень значущості $\alpha$												
	0,005	0,01	0,025	0,05	0,1	0,25	0,5	0,75	0,9	0,95	0,975	0,99	0,995
1	7,87944	6,63490	5,02389	3,84146	2,70554	1,32330	0,45494	0,10153	0,01579	0,00393	0,00098	0,00016	0,00004
2	10,59663	9,21034	7,37776	5,99146	4,60517	2,77259	1,38629	0,57536	0,21072	0,10259	0,05064	0,02010	0,01003
3	12,83816	11,34487	9,34840	7,81473	6,25139	4,10834	2,36597	1,21253	0,58437	0,35185	0,21580	0,11483	0,07172
4	14,86026	13,27670	11,14329	9,48773	7,77944	5,38527	3,35669	1,92256	1,06362	0,71072	0,48442	0,29711	0,20699
5	16,74960	15,08627	12,83250	11,07050	9,23636	6,62568	4,35146	2,67460	1,61031	1,14548	0,83121	0,55430	0,41174
6	18,54758	16,81189	14,44938	12,59159	10,64464	7,84080	5,34812	3,45460	2,20413	1,63538	1,23734	0,87209	0,67573
7	20,27774	18,47531	16,01276	14,06714	12,01704	9,03715	6,34581	4,25485	2,83311	2,16735	1,68987	1,23904	0,98926
8	21,95495	20,09024	17,53455	15,50731	13,36157	10,21885	7,34412	5,07064	3,48954	2,73264	2,17973	1,64650	1,34441
9	23,58935	21,66599	19,02277	16,91898	14,68366	11,38875	8,34283	5,89883	4,16816	3,32511	2,70039	2,08790	1,73493
10	25,18818	23,20925	20,48318	18,30704	15,98718	12,54886	9,34182	6,73720	4,86518	3,94030	3,24697	2,55821	2,15586
11	26,75685	24,72497	21,92005	19,67514	17,27501	13,70069	10,34100	7,58414	5,57778	4,57481	3,81575	3,05348	2,60322
12	28,29952	26,21697	23,33666	21,02607	18,54935	14,84540	11,34032	8,43842	6,30380	5,22603	4,40379	3,57057	3,07382
13	29,81947	27,68825	24,73560	22,36203	19,81193	15,98391	12,33976	9,29907	7,04150	5,89186	5,00875	4,10692	3,56503
14	31,31935	29,14124	26,11895	23,68479	21,06414	17,11693	13,33927	10,16531	7,78953	6,57063	5,62873	4,66043	4,07467
16	34,26719	31,99993	28,84535	26,29623	23,54183	19,36886	15,33850	11,91222	9,31224	7,96165	6,90766	5,81221	5,14221
17	35,71847	33,40866	30,19101	27,58711	24,76904	20,48868	16,33818	12,79193	10,08519	8,67176	7,56419	6,40776	5,69722
18	37,15645	34,80531	31,52638	28,86930	25,98942	21,60489	17,33790	13,67529	10,86494	9,39046	8,23075	7,01491	6,26480
19	38,58226	36,19087	32,85233	30,14353	27,20357	22,71781	18,33765	14,56200	11,65091	10,11701	8,90652	7,63273	6,84397
20	39,99685	37,56623	34,16961	31,41043	28,41198	23,82769	19,33743	15,45177	12,44261	10,85081	9,59078	8,26040	7,43384
21	41,40106	38,93217	35,47888	32,67057	29,61509	24,93478	20,33723	16,34438	13,23960	11,59131	10,28290	8,89720	8,03365
22	42,79565	40,28936	36,78071	33,92444	30,81328	26,03927	21,33705	17,23962	14,04149	12,33801	10,98232	9,54249	8,64272
23	44,18128	41,63840	38,07563	35,17246	32,00690	27,14134	22,33688	18,13730	14,84796	13,09051	11,68855	10,19572	9,26042
24	45,55851	42,97982	39,36408	36,41503	33,19624	28,24115	23,33673	19,03725	15,65868	13,84843	12,40115	10,85636	9,88623
25	46,92789	44,31410	40,64647	37,65248	34,38159	29,33885	24,33659	19,93934	16,47341	14,61141	13,11972	11,52398	10,51965
26	48,28988	45,64168	41,92317	38,88514	35,56317	30,43457	25,33646	20,84343	17,29189	15,37916	13,84391	12,19815	11,16024
27	49,64492	46,96294	43,19451	40,11327	36,74122	31,52841	26,33634	21,74941	18,11390	16,15140	14,57338	12,87850	11,80759
28	50,99338	48,27824	44,46079	41,33714	37,91592	32,62049	27,33623	22,65716	18,93924	16,92788	15,30786	13,56471	12,46134
29	52,33562	49,58788	45,72229	42,55697	39,08747	33,71091	28,33613	23,56659	19,76774	17,70837	16,04707	14,25645	13,12115
30	53,67196	50,89218	46,97924	43,77297	40,25602	34,79974	29,33603	24,47761	20,59923	18,49266	16,79077	14,95346	13,78672

### 2.3.4 Множинний регресійний аналіз

Як було показано вище, у найпростіших випадках задач прогнозування результуюча змінна  $Y$  залежить тільки від однієї пояснювальної змінної  $X$ , і ця залежність може бути описана за допомогою парної регресійної моделі. Однак у реальних задачах розвиток певних об'єктів, явищ та процесів, як правило, залежить від сукупності декількох діючих факторів. Тому виникає необхідність дослідження залежності однієї результуючої змінної  $Y$  від декількох пояснювальних змінних  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . Ця задача розв'язується за допомогою множинного регресійного аналізу.

Нехай проведено  $n$  спостережень залежної змінної  $Y$  і факторів  $X_1, X_2, \dots, X_p$ . Тоді, за аналогією з парною лінійною регресією, модель множинної лінійної регресії можна представити у вигляді

$$\begin{aligned} Y &= \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon \Rightarrow \\ \Rightarrow y_i &= \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_p x_{ip} + \varepsilon_i. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Наведена модель називається *класичною нормальною лінійною моделлю множинної регресії*.

Оскільки в регресійну модель у цьому випадку включається декілька пояснювальних змінних, то для розв'язання задач, пов'язаних з нею, доцільно використовувати матричні позначення.

Введемо наступні позначення:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{pmatrix}, \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_p \end{pmatrix}, \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{pmatrix}, \quad (2.55)$$

де  $Y$  – матриця-стовпець розміру  $n \times 1$  значень результуючої змінної;  $X$  – матриця розміру  $n \times (p+1)$  значень пояснювальних змінних (матриця плану);  $\beta$  – матриця-стовпець розміру  $p+1$  параметрів регресійної моделі;  $\varepsilon$  – матриця-стовпець розміру  $n \times 1$  похибок (випадкових помилок, залишків).

Тоді в матричній формі класична нормальна лінійна модель множинної регресії набуде вигляду:

$$Y = X \beta + \varepsilon. \quad (2.56)$$

У матрицю  $X$  введений додатковий стовпець або фіктивна змінна  $X_0$ , всі елементи якої дорівнюють одиниці, для того, щоб при множенні  $X$  на  $\beta$  в моделі множинної регресії одержати доданок  $\beta_0$ .

Так само, як і у випадку парного регресійного аналізу, оцінкою моделі (2.56) на підставі вибірки є рівняння

$$Y = Xb + e, \quad (2.57)$$

де матриця-стовпець  $b$  є оцінкою  $\beta$  з тими ж розмірами  $p \times 1$ , матриця-стовпець  $e$  – оцінкою  $\varepsilon$  з тими ж розмірами  $n \times 1$ .

Аналогічно до випадку парної лінійної регресії, для визначення матриці-стовпця  $b$  застосуємо метод найменших квадратів.

Оскільки у випадку множинної регресійної моделі рівняння регресії має вигляд:

$$\hat{Y} = Xb, \quad (2.58)$$

то матриця-стовпець  $e$  визначається співвідношенням  $e = Y - \hat{Y} = Y - Xb$ . Скористаємося властивістю добутку транспонованої матриці-стовпця  $e^T$  на саму матрицю  $e$ :

$$e^T e = (e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_n) \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_n \end{pmatrix} = e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2.$$

Тоді умова мінімізації квадратів відхилень емпіричних значень  $y_i$  від значень  $\hat{y}_i$ , знайдених з рівняння регресії (2.58), запишеться у вигляді:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 = e^T e = (Y - Xb)^T (Y - Xb) \rightarrow \min. \quad (2.59)$$

Перемножимо в (2.59) вирази у дужках, скориставшись властивістю матриць  $(Xb)^T = b^T X^T$ . Це дасть наступний результат:

$$S = Y^T Y - Y^T Xb - b^T X^T Y + b^T X^T Xb. \quad (2.60)$$

У даному виразі матриця  $Y^T Xb$  має розмір  $(1 \times n)[n \times (p+1)][(p+1) \times 1]$ , тобто  $1 \times 1$ . Оскільки транспонування подібної матриці її не змінить, то

$Y^T X b = (Y^T X b)^T = b^T X^T Y$ . Таким чином, остаточно маємо умову мінімізації квадратів відхилень у вигляді:

$$S = Y^T Y - 2b^T X^T Y + b^T X^T X b \rightarrow \min. \quad (2.61)$$

У вираженні (2.61) матриці  $X$  та  $Y$  відомі, тому що їхні елементи одержують у результаті експерименту. Отже, зміна  $S$  залежить лише від невідомої матриці  $b$ . Але для визначення екстремуму функції декількох змінних  $S(b_0, b_1, \dots, b_p)$  необхідно її часткові похідні по цих змінних прирівняти нулю.

У матричній формі це буде мати наступний вигляд:  $\frac{\partial S}{\partial b} = 0$ .

Скориставшись правилами матричного диференціювання  $\frac{\partial(b^T c)}{\partial b} = c$ , де  $c$  – матриця-стовпець, і  $\frac{\partial(b^T A b)}{\partial b} = 2Ab$ , де  $A$  – симетрична матриця, та позначаючи  $c = X^T Y$ ,  $A = X^T X$ , знаходимо вираз:

$$\frac{\partial S}{\partial b} = -2X^T Y + 2X^T X b = 0. \quad (2.62)$$

Звідси одержуємо матричне рівняння або, що є тим самим, систему нормальних рівнянь у матричній формі:

$$X^T X b = X^T Y. \quad (2.63)$$

Обчислимо матриці  $X^T X$  і  $X^T Y$ , що входять до (2.63):

$$\begin{aligned} X^T X &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_{11} & x_{21} & \dots & x_{n1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1p} & x_{2p} & \dots & x_{np} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & \dots & x_{1p} \\ 1 & x_{21} & \dots & x_{2p} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & \dots & x_{np} \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} n & \sum x_{i1} & \dots & \sum x_{ip} \\ \sum x_{i1} & \sum x_{i1}^2 & \dots & \sum x_{i1} x_{ip} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum x_{ip} & \sum x_{i1} x_{ip} & \dots & \sum x_{ip}^2 \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (2.64)$$

$$X^T Y = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_{11} & x_{21} & \dots & x_{n1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{1p} & x_{2p} & \dots & x_{np} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum y_i \\ \sum y_i x_{i1} \\ \dots \\ \sum y_i x_{ip} \end{pmatrix}. \quad (2.65)$$

У тому випадку, коли  $p=1$ , тобто фактор один, з (2.60)–(2.63) можна одержати систему нормальних рівнянь однофакторної моделі для визначення  $b_0$  і  $b_1$ .

Як відомо з лінійної алгебри, розв'язком матричного рівняння (2.65) буде матриця-стовпець

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (2.66)$$

де  $(X^T X)^{-1}$  – зворотна матриця. Знайти зазначену зворотну матрицю можна лише в тому випадку, коли вихідна матриця  $X^T X$  є невиродженою, тобто її визначник не дорівнює нулю.

Отже, ранг матриці повинен дорівнювати її порядку:  $rg(X^T X) = p+1$ . З лінійної алгебри відомо, що в цьому випадку і  $rg(X) = p+1$ . Але це можливо лише тоді, коли стовпці матриці  $X$  лінійно незалежні.

Ця умова автоматично висуває вимогу до кількості рядків матриці  $X$ , тобто до числа спостережень над пояснюючими і результуючими змінними: їх повинно бути не менше кількості стовпців, тобто  $n \geq p+1$ .

У протилежному випадку ранг матриці стане менше  $p+1$  і матричне рівняння розв'язати буде неможливо. На практиці для одержання надійних статистичних результатів беруть  $n > p+1$ .

Таким чином, знаючи матрицю-стовпець  $b$  із рівняння множинної регресії (2.66) можна знайти значення  $\hat{Y}$  для кожного конкретного набору значень пояснювальної змінної  $X$ .

У тому випадку, коли необхідно провести порівняння впливу на залежну змінну різних пояснювальних змінних, використовують, наприклад, стандартизований коефіцієнт еластичності  $E_j$ :

$$E_j = b_j \frac{\bar{x}_j}{\bar{y}}. \quad (2.67)$$

Стандартизований коефіцієнт еластичності  $E_j$  показує, на скільки відсотків зміниться в середньому  $Y$  при збільшенні  $X_j$  на 1 %.

## 2.4 Теоретичні основи прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій

В основу математичних моделей прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій (НС) техногенного і природного характеру покладений причинно-наслідковий зв'язок двох процесів: дії вражаючих чинників на об'єкт і опір самого об'єкту цій дії. Обидва процеси носять чітко виражений випадковий характер.

Наприклад, внаслідок того, що неможливо заздалегідь достовірно визначити, яка інтенсивність коливання земної кори діятиме в районі розташування будівлі або яка величина тиску у фронті повітряної ударної хвилі діятиме на споруду. Ці вражаючі чинники з різною ймовірністю можуть набувати різних значень.

Крім того, навіть за умов однакового впливу вражаючого фактора на будівлі існуватиме різна ймовірність їх руйнування. На ймовірність руйнування будівель впливає неоднорідність міцності матеріалів, відхилення будівельних елементів від проектних розмірів, відмінність умов виготовлення елементів та інші чинники.

Ураження людей залежатиме як від перерахованих чинників, так і від ряду інших випадкових подій. Зокрема від імовірності розміщення людей в зоні ризику, щільності розселення в межах населеного пункту та ймовірності ураження людей уламками у випадку отримання будівлями певного ступеня ушкодження.

Отже, можна зробити висновок про те, що для оцінки наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру необхідно застосовувати ймовірнісний підхід.

Таблиця 2.4 – Вражаючі фактори та їх основні параметри

Вид НС	Вражаючий чинник	Параметр
Землетрус Вибухи	Уламки будівель і споруд Повітряна ударна хвиля	Інтенсивність землетрусу Надмірний тиск у фронті повітряної ударної хвилі
Пожежі Прорив дамб	Теплове випромінювання Хвиля цунамі; хвиля прориву	Щільність теплового потоку Висота хвилі; максимальна швидкість хвилі; площа і тривалість затоплення; тиск гідравлічного потоку
Радіаційні аварії Хімічні аварії	Радіаційне зараження Токсичні навантаження	Дози опромінювання Гранично допустима концентрація, токсична доза

Назвемо основні фактори, що впливають на наслідки надзвичайних ситуацій:

- інтенсивність дії вражаючих факторів;
- розміщення населеного пункту відносно осередку надзвичайної ситуації;
- характеристика ґрунтів;

- конструктивні рішення та міцнісні властивості будівель і споруд;
- щільність забудови і розселення людей в межах населеного пункту;
- розміщення людей в будівлях протягом доби та в зоні ризику протягом року.

Перераховані характеристики коротко називають *просторово-часовими факторами*.

У якості вражаючого фактора при розрахунку наслідків НС приймають той фактор, що викликає основні руйнування та ураження.

Вражаючі фактори НС техногенного і природного характеру та їх основні параметри наведено в табл. 2.4.

#### **2.4.1 Моделі впливу вражаючих факторів надзвичайних ситуацій**

Вплив, пов'язаний з надзвичайними ситуаціями техногенного і природного характеру, описується у вигляді аналітичних, табличних або графічних залежностей. Ці залежності дозволяють визначити інтенсивність вражаючих факторів тієї або іншої надзвичайної ситуації в заданій точці. Залежності, що визначають поля вражаючих факторів при прогнозуванні наслідків НС, називають *моделями впливу*, маючи на увазі те, що вони характеризують інтенсивність і масштаб впливу.

Розрахункові випадки можна звести до наступних типів моделей впливу:

1. Детермінована модель (базується на інформації про НС, що сталася. Характерними параметрами цієї моделі є координати осередку НС, інтенсивність або потужність дії, час).

2. Ймовірнісна модель (в даному випадку є заданою функція  $F(x, y, \Phi)$  – функція розподілу випадкової величини  $\Phi$ , що являє собою інтенсивність вражаючого фактора, характерного для вказаної надзвичайної ситуації (рис. 2.7, а), або функція  $f(x, y, \Phi)$ , – щільність розподілу випадкової величини  $\Phi$  (рис. 2.7, б). Тут  $(x, y)$  – координати заданої точки).

3. Вплив може характеризуватися статистичним матеріалом за даними натурних спостережень у регіоні. Ці моделі є характерними, наприклад, для повеней. Зазвичай ці моделі приводяться у вигляді таблиці.

4. Інтенсивність дії може бути задана на підставі спостережень і завчасно проведених розрахунків (карта сейсмічного районування території). Для сейсмонебезпечних регіонів складено карти детального сейсмічного районування, а для міст проведено мікросейсморайонування. При мікросейсморайонуванні визначається сейсмічність окремих майданчиків (кварталів) у межах міста. Зазвичай ці моделі приводяться у графічному вигляді (у формі ізолій на картах) або в табличному вигляді.

Необхідно зазначити, що надалі будемо розглядати ймовірнісні моделі впливу вражаючих факторів надзвичайних ситуацій. Функція розподілу  $F(x, y, \Phi)$  випадкової величини, характерної для деякої НС, являє собою ймовірність того, що випадкова величина  $\Phi$  в точці з координатами  $(x, y)$  набуватиме значень не вище заданої величини  $\Phi_3$ :



$$F(x, y, \Phi) = P(\Phi \leq \Phi_3).$$

Як випадкову величину розглядають параметри чинників ураження (табл. 2.3).

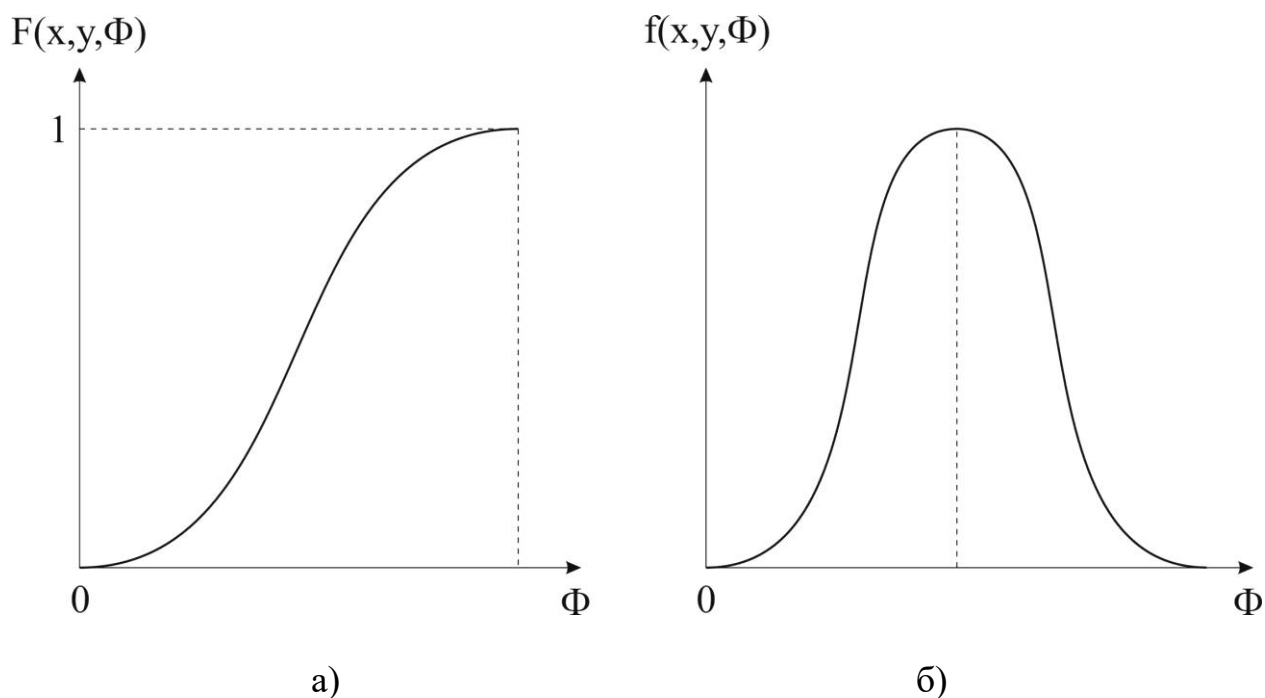


Рисунок 2.7 – Закони розподілу вражаючих факторів

Функція розподілу  $F(x, y, \Phi)$  має наступні властивості:

- $F(x, y, \Phi)$  є зростаючою функцією;
- $F(x, y, -\infty) = 0$ ;
- $F(x, y, +\infty) = 1$ .

Щільність імовірності  $f(x, y, \Phi)$  дорівнює похідній від функції розподілу  $F(x, y, \Phi)$ :

$$f(x, y, \Phi) = F'(x, y, \Phi), \quad (2.68)$$

і навпаки,  $F(x, y, \Phi)$  виражається через щільність  $f(x, y, \Phi)$  інтегралом вигляду:

$$F(x, y, \Phi) = \int_{-\infty}^{\Phi} f(x, y, t) dt, \quad (2.69)$$

де  $t$  – змінна інтегрування.

Основна властивість щільності ймовірності  $f(x, y, \Phi)$  – це рівність 1 площі, яка обмежена функцією і віссю  $\Phi$  (рис. 2.7, б).

Функції розподілу  $F(x, y, \Phi)$  чинників ураження і щільності розподілу  $f(x, y, \Phi)$  визначають на основі статистичної обробки результатів спостережень або розрахунковим шляхом.

## 2.4.2 Закони руйнування споруд і ураження людей

### 2.4.2.1 Закони руйнування споруд

Процес опору впливу описується законами руйнування і ураження  $F(\Phi)$ .

Закони руйнування характеризують уразливість споруд, а закони ураження – уразливість людей в зонах НС. Ці терміни є основними при прогнозуванні наслідків НС.

Під *законом руйнування споруди* розуміють залежність між імовірністю її ушкодження і відстанню до споруди або інтенсивністю прояву чинника ураження.

Якщо ця залежність від відстані, то закон називають *координатним законом руйнування* (рис. 2.8, а). У випадку, коли залежність отримують від фактора ураження, закон називають *параметричним законом руйнування* (рис. 2.8, б). При оцінці наслідків НС у системі цивільного захисту найбільшого поширення набули *параметричні закони руйнування*.

Закони руйнування споруд отримують на основі аналізу та узагальнення статистичних матеріалів по руйнуванню житлових і промислових будівель від дій чинників ураження. Якщо статистичні матеріали по руйнуванню окремих типів споруд відсутні, то закони руйнування можуть бути отримані розрахунковими методами.

Знаходять застосування параметричні закони руйнування двох типів:

– ймовірність настання не менше певного ступеня руйнування (ушкодження) споруд –  $P_{A_i}(\Phi)$ ;

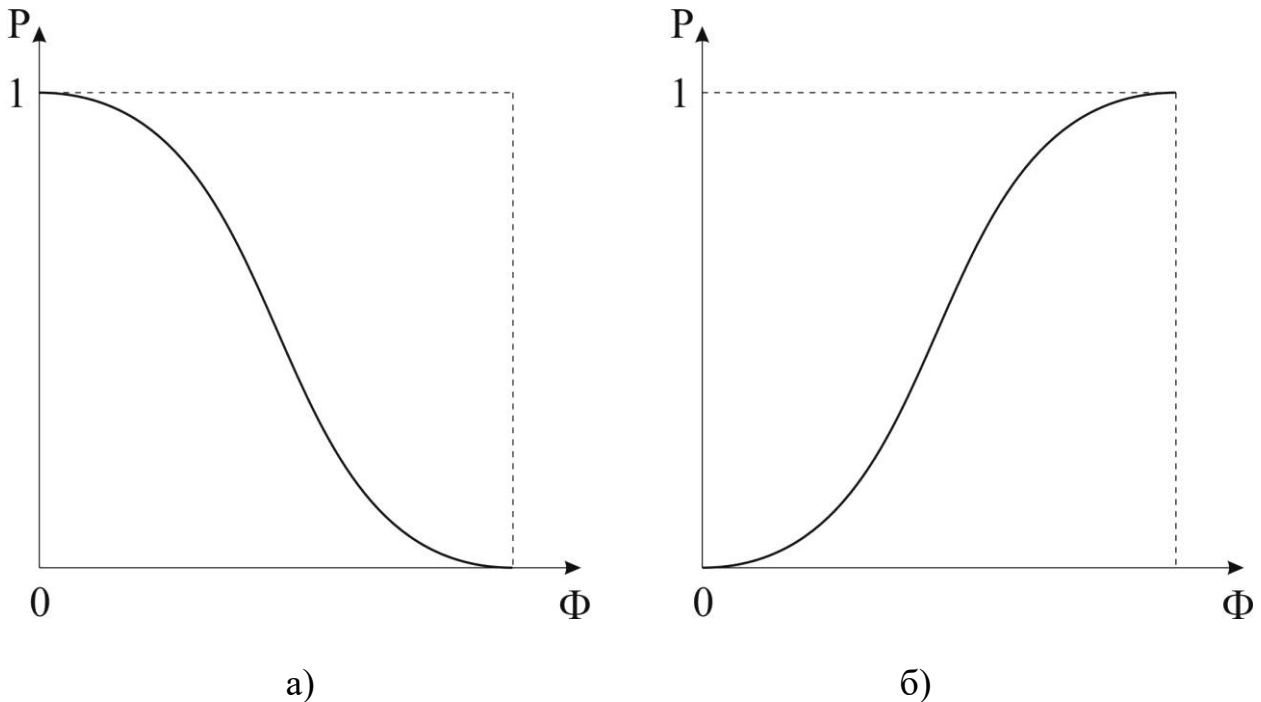
– ймовірність настання певного ступеня руйнування (ушкодження) споруд –  $P_{B_i}(\Phi)$ .

Для побудови кривої, що апроксимує ймовірність настання не менше певного ступеня руйнування (ушкодження) споруд, зазвичай використовується нормальний закон. При цьому враховується, що для однієї й тієї ж споруди може розглядатися не один, а декілька ступенів руйнування.

Обчислення значень імовірності  $P_{A_i}(\Phi)$  найчастіше проводиться за формулою для нормального закону:

$$P_{A_i}(\Phi) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \int_0^{\Phi} e^{-\frac{(\bar{\Phi} - M_i)^2}{2\sigma_i^2}} d\bar{\Phi}, \quad (2.70)$$

де  $\bar{\Phi}$  – змінна інтегрування випадкової величини;  $M_i$ ,  $\sigma_i$  – математичне очікування і середньоквадратичне відхилення випадкової величини для  $i$ -го ступеня руйнування споруд, визначені на підставі статистичної обробки результатів експериментів або розрахунковим шляхом.



**Рисунок 2.8 – Координатний (а) і параметричний (б) закони руйнування (ураження):**  
 $P$  – ймовірність руйнування;  $R$  – відстань від осередку НС до об'єкта;  $\Phi$  – інтенсивність чинника ураження

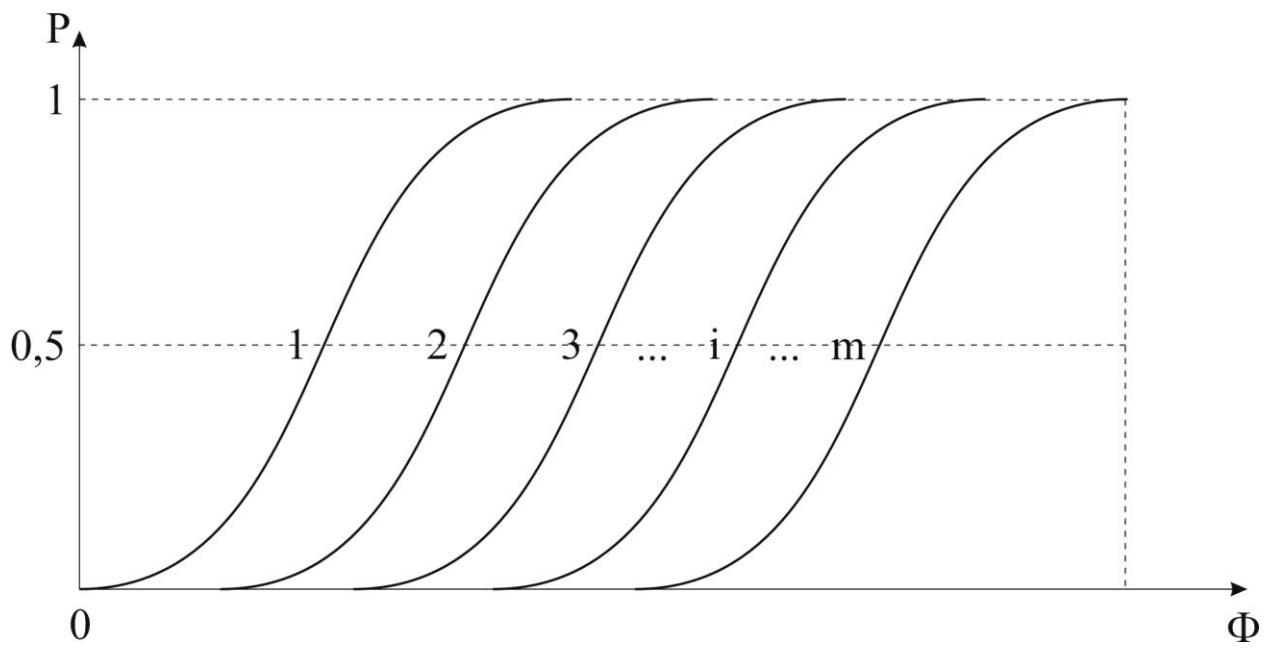
При визначенні ймовірності настання певного ступеня руйнування (ушкодження) споруд враховують теорему про повну групу подій

$$\sum_{i=0}^m P_{B_i}(\Phi) = 1, \quad (2.71)$$

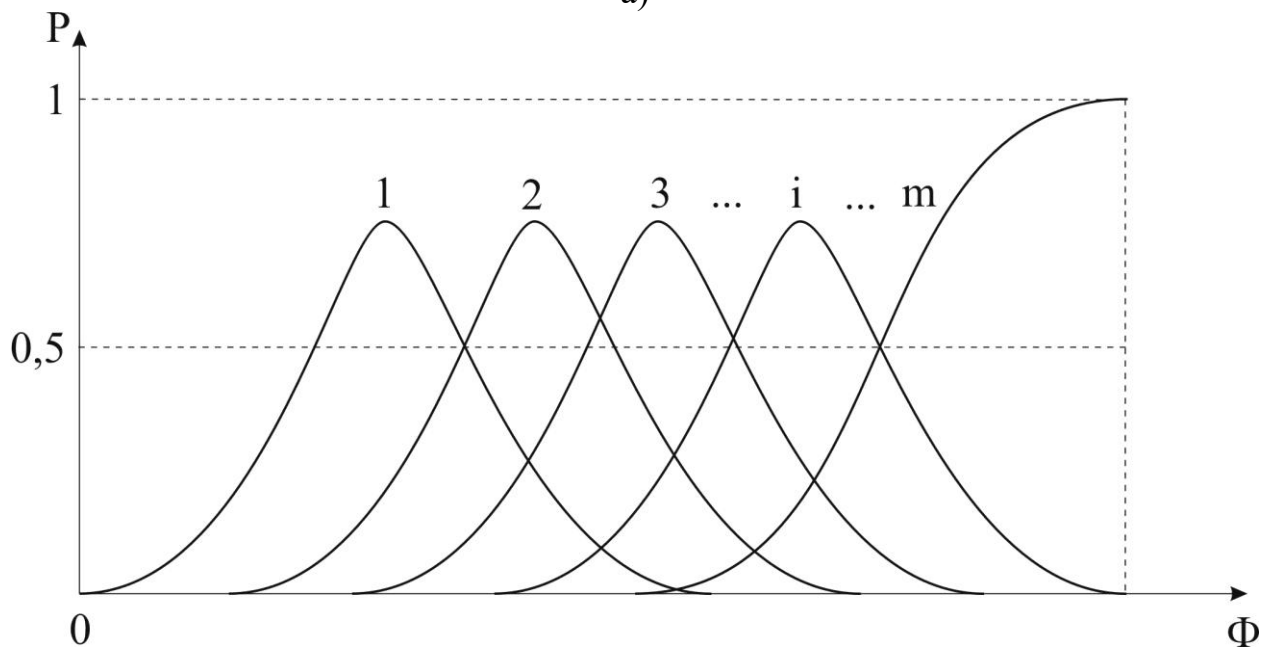
де  $m$  – кількість даних подій.

Вважається, що після дії чинника ураження споруда може бути віднесена до однієї з  $m$  несумісних подій:

- виявитися неушкодженою (подія  $B_0$ );
- отримати  $1, 2, \dots, i$ -й ступені руйнування (ушкодження) ( $B_1, B_2, \dots, B_i$ ).



а)



б)

**Рисунок 2.9 – Закони руйнування споруд:**

а) ймовірність виникнення не менше певних ступенів руйнування споруд; б) ймовірність виникнення певних ступенів руйнування споруд;  $1, 2, \dots, m$  – ступені руйнування (ушкодження) споруд

Ймовірність настання певного ступеня руйнування (ушкодження) будівель може бути визначено безпосередньо з наступних залежностей:

$$\begin{aligned}
P_{B_m}(\Phi) &= P_{A_m}(\Phi), \\
P_{B_{m-1}}(\Phi) &= P_{A_{m-1}}(\Phi) - P_{A_m}(\Phi), \\
&\vdots \\
P_{B_i}(\Phi) &= P_{A_i}(\Phi) - P_{A_{i+1}}(\Phi), \\
&\vdots \\
P_{B_1}(\Phi) &= P_{A_1}(\Phi) - P_{A_2}(\Phi), \\
P_{B_0}(\Phi) &= P_{A_0}(\Phi) - P_{A_1}(\Phi),
\end{aligned} \tag{2.72}$$

де  $P_{A_1}(\Phi), P_{A_2}(\Phi), \dots, P_{A_i}(\Phi)$  – ймовірність настання не менше  $1, 2, \dots, i$ -го ступеня руйнування (ушкодження) споруд;  $m$  – кількість ступенів руйнування (ушкодження) споруд.

В наш час закони руйнування отримано для захисних споруд і будівель різних типів на випадок впливу факторів ураження ядерної зброї, вибухів техногенного характеру, а також для будівель різної сейсмостійкості на дію землетрусу.

#### 2.4.2.2 Закони ураження людей

Під *законом ураження людей* будемо розуміти залежність між ймовірністю ураження людей та інтенсивністю чинника ураження.

Параметричні закони ураження людей, розміщених у будинках, отримано на підставі теореми повної ймовірності. Вважається, що подія  $C$  (загальні, незворотні, санітарні втрати) може статися в разі отримання будинком одного зі ступенів ушкодження (при одній з гіпотез  $B_i$ ), які утворюють повну групу несумісних подій. Розрахунки виконуються за формулою

$$P(\Phi) = \sum_{i=1}^m P_{B_i}(\Phi) \cdot P(C|B_i), \tag{2.73}$$

де  $P(\Phi)$  – ймовірність ураження людей від дії вражаючого чинника  $\Phi$ ;  $P_{B_i}(\Phi)$  – ймовірність настання  $i$ -го ступеня ушкодження будівлі за заданого значення вражаючого чинника (закон руйнування);  $P(C|B_i)$  – ймовірність ураження людей за умови того, що будівля отримала  $i$ -ту ступінь ушкодження;  $m$  – кількість ступенів ушкодження будівлі.

Значення  $P(C|B_i)$  отримують на основі обробки матеріалів про наслідки аварій та стихійних лих.

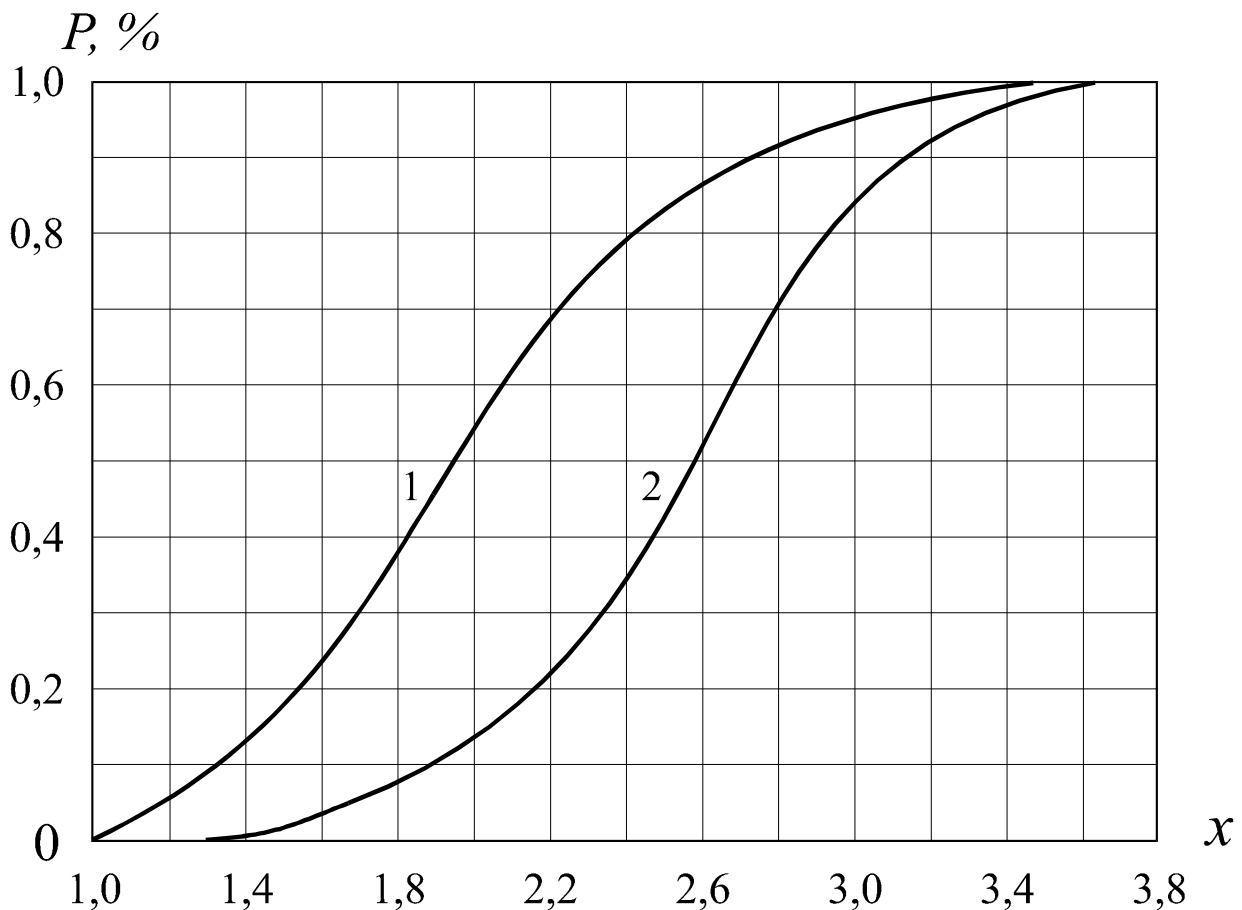


Рисунок 2.10 – Закони ураження захищеного населення: 1 – загальні втрати; 2 – незворотні втрати;  $x = \frac{\Delta P_{\phi}}{\Delta P_{\phi, \text{розр}}}$ ,  $\Delta P_{\phi}$  – тиск у фронті повітряної ударної хвилі;  $\Delta P_{\phi, \text{розр}}$  – ступінь захисту тих, хто укривається

На рис. 2.10 як приклад наведено закони ураження захищеного населення від дії повітряної ударної хвилі. Аналогічні закони ураження отримано для людей, що знаходяться в будівлях під час землетрусів, а також на випадок хімічних і радіаційних аварій.

### 2.4.3 Математичне очікування об'ємів руйнувань і уражень людей

Задача щодо прогнозування наслідків крупних аварій і катастроф у великих населених пунктах розв'язується наступним чином.

Місто (населений пункт) розбивається на елементарні майданчики, а їх координати подаються точками, розташованими в центрах майданчиків. Крок сітки признається залежно від точки розрахунку.

Точність розрахунку визначається таким чином. Прогнозуються втрати населення під час першої підготовці початкових даних. Потім кількість елементарних майданчиків збільшують і проводять повторне обчислення. Якщо виконується умова

$$\Delta = \left| \frac{M_1(N) - M_2(N)}{M_1(N)} \right| \leq [\delta], \quad (2.74)$$

то обчислення закінчують.

У формулі (2.74) взято наступні позначення:  $\Delta$  – похибка розрахунків;  $M_1(N)$ ,  $M_2(N)$  – математичне очікування втрат населення, відповідно при першому і другому розрахунках;  $[\delta]$  – допустима похибка.

Для кожного елементарного майданчика готують початкові дані, що включають:

- конструкцію будівель;
- характеристику забудови;
- кількість людей.

Задача щодо визначення наслідків надзвичайних ситуацій в малих населених пунктах регіону вирішується аналогічно. При цьому населений пункт у цілому розглядається у вигляді одного елементарного майданчика, а його координати представляються точкою в центрі населеного пункту.

Початок координат розрахункової схеми вибирається довільно на плані або приймається в системі координат карти, на якій показаний регіон.

При прогнозуванні зазвичай визначають математичні очікування показників, що характеризують ушкодження та ураження в осередку аварії або катастрофи. Такими показниками є:

- кількість будівель, що отримали той або інший ступінь ушкодження;
- об'єм завалів;
- кількість потерпілих.

#### *Математичне очікування кількості зруйнованих будівель*

У процесі прогнозування можуть зустрітися два розрахункові випадки:  
випадок 1 – якщо інтенсивність і координати місця аварії або катастрофи завчасно задані або приймаються за фактичними даними;

випадок 2 – коли дія розглядається у вигляді ймовірнісної моделі.

За заданого значення вражаючого чинника  $\Phi_3$  (випадок 1) зазначена задача вирішується наступним чином. Приймається, що в межах даного майданчика будівлі розміщуються з щільністю  $\varphi(x, y)$  (кількість будівель на одиницю майданчика з координатами центру  $(x, y)$ ). Тоді кількість будівель у межах майданчика визначається наступним чином:

$$V(x, y) = \varphi(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y,$$

де  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  – розміри елементарного майданчика.

Математичне очікування кількості будівель, що отримали ступінь ушкодження  $i$  в межах майданчика за заданої інтенсивності вражаючого чинника, буде дорівнювати

$$M[V_i(x, y)] = P_{B_i}(\Phi_3) \cdot \varphi(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y, \quad (2.75)$$

де  $P_{B_i}(\Phi_3)$  – ймовірність отримання будівлями ступеня ушкодження  $i$  в разі інтенсивності вражаючого чинника  $\Phi_3$ . Ймовірність  $P_{B_i}(\Phi_3)$  визначається із законів руйнування (п. 2.4.2.1).

Підсумовуючи кількість ушкоджених будівель по кожному майданчику і переходячи до межі, отримаємо математичне очікування кількості будівель зі ступенем ушкодження  $i$  в межах всього міста

$$M(V_i) = \iint_S P_{B_i}(\Phi_3) \cdot \varphi(x, y) \cdot dx \cdot dy, \quad (2.76)$$

де  $S$  – площа міста.

У випадку ймовірнісної моделі дії (випадок 2) весь можливий діапазон інтенсивності дії вражаючого чинника поділяється на інтервали  $\Delta\Phi$ . Потім для кожного інтервалу розв'язується задача з урахуванням одночасного настання двох подій: події, яка полягає в тому, що будівлі отримують ступінь ушкодження  $i$  при значенні вражаючого чинника з цього інтервалу, і події, яка полягає в тому, що в межах даного майданчика міста діятиме вражаючий чинник з інтенсивністю з даного інтервалу. Ймовірність одночасного настання двох подій дорівнює

$$P = P_{B_i}(\Phi_3) \cdot f(x, y, \Phi_3) \cdot \Delta\Phi, \quad (2.77)$$

де  $P_{B_i}(\Phi_3)$  – ймовірність отримання будівлями ступеня ушкодження  $i$  за заданої інтенсивності вражаючого чинника  $\Phi_3$  (із закону руйнування будівель);  $f(x, y, \Phi_3) \cdot \Delta\Phi$  – величина, що визначає ймовірність того, що інтенсивність вражаючого чинника буде знаходитись у межах інтервалу  $\Delta\Phi$ .

Ймовірність отримання будівлями ступеня ушкодження  $i$  в межах даного майданчика, з урахуванням можливої дії вражаючого чинника різної інтенсивності, буде дорівнювати

$$P_i(x, y) = \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P_{B_i}(\Phi) \cdot f(x, y, \Phi) \cdot d\Phi, \quad (2.78)$$

де  $\Phi_{\min}$ ,  $\Phi_{\max}$  – відповідно мінімально і максимально можливе значення вражаючого чинника для даної НС.

Математичне очікування кількості будівель зі ступенем ушкодження  $i$  в межах майданчика з координатами  $(x, y)$  у випадку ймовірнісної моделі дії визначається за формулою:



$$M[V_i(x, y)] = \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P_{B_i}(\Phi) \cdot f(x, y, \Phi) \cdot \varphi(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot d\Phi, \quad (2.79)$$

де  $\varphi(x, y)$  – щільність забудови в межах майданчика.

Підсумовуючи математичне очікування кількості ушкоджених будівель по кожному майданчику і переходячи до межі, отримаємо математичне очікування кількості ушкоджених будівель зі ступенем  $i$  в цілому по місту:

$$M(V_i) = \iint_S \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P_{B_i}(\Phi) \cdot f(x, y, \Phi) \cdot \varphi(x, y) \cdot d\Phi \cdot dx \cdot dy. \quad (2.80)$$

Якщо населений пункт невеликих розмірів, то його можна розглядати як один елементарний майданчик.

#### *Математичне очікування об'єму завалів*

Об'єм завалів в осередку аварії, катастрофи або іншої НС є основним показником, що впливає на масштабність рятувальних робіт. У зв'язку з цим розглянемо методику визначення об'єму завалів.

Нехай певний тип забудови в межах даного майданчика розміщується з щільністю забудови у відносних одиницях  $S(x, y)$ . Таку інформацію можна отримати з карти або плану. Тоді площа, що безпосередньо зайнята забудовою (площа забудови), для майданчика з координатами  $(x, y)$  складе

$$F(x, y) = S(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y, \quad (2.81)$$

а об'єм забудови можна визначити з виразу

$$Q(x, y) = H(x, y) \cdot S(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y, \quad (2.82)$$

де  $H(x, y)$  – середня висота будівель указанного майданчика.

Аналіз натурної інформації стосовно характеру руйнування забудови в населених пунктах показав, що у випадку повного руйнування будівлі практично повністю перетворюються на уламки, утворюючи завали у вигляді обелісків. В разі руйнування будівель на ступінь нижче від повного ступеня руйнування в розрахунках можна прийняти, що об'єми завалів складають приблизно 50 % від об'ємів завалів у разі повного руйнування будівель. Тоді об'єми завалів в межах  $j$ -го елементарного майданчика, за заданого значення вражаючого чинника (розрахунковий випадок 1), можна обчислити за формулою

$$M [W_j(x, y)] = [0,5P_{B_{m-1}}(\Phi_3) + P_{B_m}(\Phi_3)] \cdot H(x, y) \cdot S(x, y) \times \gamma(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y, \quad (2.83)$$

де  $P_{B_{m-1}}(\Phi_3)$  і  $P_{B_m}(\Phi_3)$  – ймовірність отримання будівлями  $m-1$  і  $m$  ступеня руйнування при дії вражаючого чинника інтенсивністю  $\Phi_3$ , що визначаються із законів руйнування;  $\gamma(x, y)$  – частка завалу в  $1 \text{ м}^3$  будівельного об'єму будівель, характерних для майданчиків (питомий об'єм завалу).

Для орієнтовних розрахунків питомий об'єм завалу можна прийняти:

- для промислових будівель  $\gamma = 0,2$ ;
- для житлових будівель  $\gamma = 0,4$ .

Підсумовуючи об'єми завалів по кожному майданчику і переходячи до межі, отримаємо об'єм завалів в межах всього населеного пункту за заданої інтенсивності землетрусу:

$$M(W) = \iint_S [0,5P_{B_{m-1}}(\Phi_3) + P_{B_m}(\Phi_3)] \cdot H(x, y) \cdot S(x, y) \times \gamma(x, y) \cdot dx \cdot dy. \quad (2.84)$$

Якщо інформація стосовно будівельного об'єму будівель у межах майданчика відома (наприклад, за даними бюро технічної інвентаризації), то об'єм завалів у межах елементарного майданчика можна обчислити за формулою:

$$M [W_j(x, y)] = [0,5P_{B_{m-1}}(\Phi_3) + P_{B_m}(\Phi_3)] \cdot Q(x, y) \cdot \gamma(x, y), \quad (2.85)$$

де  $Q(x, y)$  – будівельний об'єм будівель у межах майданчика.

Об'єм завалів у межах всього населеного пункту в цьому випадку визначається за формулою:

$$M(W) = \sum_{j=1}^n M [W_j(x, y)], \quad (2.86)$$

де  $n$  – кількість елементарних майданчиків у межах населеного пункту.

Якщо дія вражаючого чинника розглядається у вигляді ймовірнісної моделі (розрахунковий випадок 2), то математичне очікування об'єму завалу в межах елементарного майданчика визначається за формулою

$$M [W_j(x, y)] = \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} [0,5P_{B_{m-1}}(\Phi) + P_{B_m}(\Phi)] \cdot H(x, y) \cdot S(x, y) \times f(x, y, \Phi) \cdot \gamma(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot d\Phi. \quad (2.87)$$

Об'єм завалів у межах всього міста в цьому випадку розраховується за формулою:

$$M(W) = \iint_S \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} \left[ 0,5P_{B_{m-1}}(\Phi) + P_{B_m}(\Phi) \right] \cdot H(x, y) \cdot S(x, y) \times \quad (2.88) \\ \times f(x, y, \Phi) \cdot \gamma(x, y) \cdot d\Phi \cdot dx \cdot dy.$$

Коли будівельні об'єми будівель у межах майданчиків відомі, об'єми завалів у межах цих майданчиків при ймовірнісній моделі впливу обчислюються за формулою:

$$M[W_j(x, y)] = \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} \left[ 0,5P_{B_{m-1}}(\Phi) + P_{B_m}(\Phi) \right] \cdot f(x, y, \Phi) \times \quad (2.89) \\ \times Q(x, y) \cdot \gamma(x, y) \cdot d\Phi.$$

Об'єм завалів у межах всього населеного пункту в цьому випадку визначається за формулою (2.86).

#### *Математичне очікування ураження людей*

Розглянемо задачу визначення ймовірності ураження людей, що знаходяться в місті в межах невеликого майданчика з координатами  $(x, y)$ . При цьому вихідними даними є параметричний закон ураження людей  $P(\Phi)$  і функція щільності розподілу  $f(x, y, \Phi)$  інтенсивності вражаючого чинника (випадок, коли вплив розглядається у вигляді ймовірнісної моделі).

Нехай в межах елементарного майданчика з координатами  $(x, y)$  діє вражаючий чинник з інтенсивністю  $\Phi_3$ . Тоді ймовірність виконання двох подій: події, яка полягає в тому, що люди будуть уражені за заданої інтенсивності вражаючого чинника, і події, яка полягає в тому, що в межах даного майданчика діятиме вражаючий чинник із заданою інтенсивністю, буде дорівнювати:

$$P = P(\Phi_3) \cdot f(x, y, \Phi_3) \cdot \Delta\Phi, \quad (2.90)$$

де  $P(\Phi_3)$  – ймовірність ураження людей при дії вражаючого чинника з інтенсивністю  $\Phi_3$ ;  $f(x, y, \Phi_3) \cdot \Delta\Phi$  – ймовірність потрапляння значення вражаючого фактора на інтервал  $\Delta\Phi$ .

Ймовірність ураження населення в межах даного майданчика, з урахуванням можливої дії вражаючого чинника різної інтенсивності, буде дорівнювати:

$$P(x, y) = \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P(\Phi) \cdot f(x, y, \Phi) \cdot d\Phi, \quad (2.91)$$

де  $\Phi_{\min}$ ,  $\Phi_{\max}$  – відповідно мінімально і максимально можливе значення вражаючого чинника даної НС;  $P(\Phi)$  – параметричний закон ураження людей;  $f(x, y, \Phi)$  – функція щільності розподілу інтенсивності вражаючого чинника в межах майданчика з координатами  $(x, y)$ .

Математичне очікування втрат людей в межах всього міста визначається за формулою:

$$M(N) = \iint_S \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P(\Phi) \cdot f(x, y, \Phi) \cdot \psi(x, y) \cdot d\Phi \cdot dx \cdot dy, \quad (2.92)$$

де  $S$  – площа міста;  $\psi(x, y)$  – щільність населення в межах елементарного майданчика.

Математичне очікування втрат людей (загальних, незворотних, санітарних) і структура за тяжкістю ураження можуть бути визначені з урахуванням ймовірності розміщення людей в зоні ризику за формулою:

$$M(N) = \iint_S \int_0^{24} \int_{\Phi_{\min}}^{\Phi_{\max}} P(\Phi) \cdot f(x, y, \Phi) \cdot \psi(x, y) \cdot f(t) \cdot d\Phi \cdot dt \cdot dx \cdot dy, \quad (2.93)$$

де  $f(t)$  – функція щільності розподілу ймовірності, яка характеризує розміщення людей в будівлях залежно від часу доби.

Функцію  $f(t)$  отримують на основі статистичного аналізу матеріалів із міграції населення в місті протягом доби.

### Контрольні питання та завдання

1. Дайте визначення поняття «прогноз».
2. Поясніть та дайте визначення поняття «прогнозування».
3. Поясніть, яким чином поділяються методи прогнозування залежно від їх мети
4. Укажіть, як поділяється прогнозування за періодом випередження.
5. Назвіть основні принципи здійснення прогнозування.
6. Охарактеризуйте наступні принципи прогнозування – принципи «системності» та «наукової обґрунтованості».
7. Охарактеризуйте наступні принципи прогнозування – принципи «цілеспрямованості» й «адекватності».

8. Охарактеризуйте наступні принципи прогнозування – принципи «альтернативності» та «історичності».
9. Назвіть основні завдання прогнозування.
10. Назвіть та охарактеризуйте стадії наукового аналізу прогнозів.
11. Поясніть, що розуміється під методами прогнозування?
12. Розкрийте сутність статистичних методів прогнозування.
13. Розкрийте сутність методу аналогій та випереджальних методів прогнозування.
14. Розкрийте, у чому полягає сутність формалізованих методів прогнозування.
15. Розкрийте сутність інтуїтивних методів прогнозування.
16. Поясніть сутність інтерполяційних методів прогнозування.
17. Розкрийте сутність екстраполяційних методів прогнозування.
18. Розкрийте сутність методу найменших квадратів.
19. Дайте визначення поняття «тренд явища».
20. Дайте визначення поняття «ряди динаміки».
21. Назвіть основні та додаткові показники рядів динаміки.
22. Як отримують систему нормальних рівнянь у методі найменших квадратів?
23. Що являє собою рівняння регресії?
24. Сформулюйте основні задачі регресійного аналізу.
25. Яким чином записується рівняння парної регресії?
26. Дайте визначення коефіцієнта кореляції.
27. Що являє собою класична нормальна лінійна модель множинної регресії?
28. Які процеси покладені в основу математичних моделей прогнозування наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру?
29. Назвіть основні фактори, що впливають на наслідки надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру.
30. Що таке вражаючий фактор НС?
31. Назвіть основні типи моделей впливу вражаючих факторів НС.
32. Дайте визначення закону руйнування споруд.
33. Назвіть основні типи законів руйнування споруд.
34. Дайте визначення закону ураження людей.
35. Опишіть загальний підхід до визначення математичного очікування об'ємів руйнувань і уражень людей.

## ГЛАВА 3. ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ

### 3.1 Методика прогнозування паводкової повені

Під повінню розуміється затоплення водою прилеглої до річки, озера або водосховища місцевості, яка заподіює матеріальний збиток, завдає шкоди здоров'ю населення або призводить до загибелі людей. Затопленням місцевості вважається розлив річки, озера або водосховища, що не супроводжується матеріальними збитками.

За повторюваністю, площею поширення і середньорічним матеріальним збитком у масштабах нашої країни повіннь займає перше місце серед стихійних лих. Особливістю повеней, як і деяких інших надзвичайних ситуацій природного характеру, є те, що запобігти їх виникненню майже неможливо. Для вирішення проблем, пов'язаних із повенями, можна використовувати різні організаційно-технічні рішення, реалізація яких може тільки знизити можливі наслідки. Причому величина збитку від повені значною мірою залежить від ступеня заселеності та забудови міст і населених пунктів. Тому повенями є не тільки явища природи, але й явища соціального порядку.

Основними природно-географічними умовами виникнення повеней є: випадіння опадів у вигляді дощу, танення снігу і льоду, спорожнення водосховищ. Найбільш часті повені виникають під час активного випадіння опадів у вигляді дощу, в разі швидкого танення снігу та при заторах льоду на річках. Вельми небезпечними є повені, що пов'язані з руйнуванням гідротехнічних споруд (ГЕС, греблі, дамби).

Залежно від причин виникнення повені розподіляють на п'ять груп:

1-ша група – повені, пов'язані в основному з максимальним стоком від весняного танення снігу. Такі повені відрізняються значним і досить тривалим підйомом рівня води в річках і називаються, зазвичай, *повінню*.

2-га група – повені сформовані інтенсивними дощами, іноді – таненням снігу під час зимової відлиги. Вони характеризуються інтенсивними, порівняно короткочасними підйомами рівня води і називаються *паводками*.

3-тя група – повені що викликаються, в основному, великим опором, з яким водний потік стикається в річці. Це зазвичай відбувається на початку і в кінці зими в разі виникнення заторів і зажорів льоду.

4-та група – повені, що створюються вітровими наганяннями води на крупних озерах і водосховищах, а також у морських гирлах річок.

5-та група – повені, що створюються у випадку прориву або руйнування гідровузлів.

За розмірами збитків та масштабністю повені розподіляються на чотири групи:

– *низькі (малі) повені*, які спостерігаються, в основному, на рівнинних річках, завдають незначного матеріального збитку і майже не порушують ритму життя населення;

– *високі повені*, що супроводжуються значним затопленням, охоплюють порівняно великі ділянки річкових долин та іноді істотно порушують господарський і побутовий устрій населення. У густонаселених районах високі повені призводять до часткової евакуації населення;

– *потужні повені*, що охоплюють цілі річкові басейни. Вони паралізують господарську діяльність, завдають великого матеріального збитку, призводять до масової евакуації населення і матеріальних цінностей;

– *катастрофічні повені* – затоплення величезних територій в межах однієї або декількох річкових систем. Такі повені призводять до величезних матеріальних збитків та загибелі людей.

Для зниження матеріального збитку і підвищення безпеки населення проводиться завчасне короткострокове прогнозування можливих наслідків повені.

Під *короткостроковим прогнозуванням* слід розуміти складання гідрологічного прогнозу характеру і наслідків повені не більше ніж за 12–15 днів.

Під *паводковою повинню* слід розуміти інтенсивний, порівняно короткочасний, підйом рівня води, що формується сильними дощами.

Для короткострокового прогнозування паводкової повені необхідно завчасно провести зйомку мережі гідрографії території, мати відомості щодо характеристик річок в їх природному стані, виявити чинники і явища, які можуть внести зміни в режим водних перешкод.

Ці дані можуть бути одержані з наступних джерел: карт, описів, довідкової та спеціальної літератури. Різноманітні за характером і ступенем деталізації дані про водні перешкоди містять великомасштабні (1:25000; 1:50000) топографічні карти, лоцманські карти, лоції, перспективні карти річок, карти умов прохідності місцевості, геологічні, гідрологічні, кліматологічні карти тощо.

З довідкової та спеціальної літератури можуть бути використані довідники із кліматології, гідрографії, водного господарства та водних ресурсів, атласи фізико-географічних даних, гідрологічні щорічники тощо.

На етапі складання короткострокового прогнозу паводкової повені необхідно спрогнозувати:

- гідрологічні й морфологічні характеристики річок;
- можливу обстановку в разі затоплення місцевості паводковими водами;
- сили і засоби ліквідації наслідків паводкової повені.

У процесі прогнозування гідрологічних і морфологічних характеристик повинна бути розроблена розрахункова схема і визначені:

- об'єми стоку дощових вод ( $W^0$ );
- максимальні глибини затоплення ( $H$ );
- швидкості руху хвилі ( $V$ );
- часові параметри хвилі ( $T_{xв}$ );
- максимальні витрати потоку у природному стані та в період паводкової повені ( $Q$ );
- максимальна ширина затоплень ( $B$ );
- часові параметри затоплень ( $T$ ).

На підставі вищенаведених характеристик повинен бути побудований графік руху паводкової хвилі, який дозволить визначити гідрологічні характеристики водного потоку в будь-якому змінному створі знаходження між двома постійними.

При розробці розрахункової схеми основним джерелом відомостей про щільність, склад і будову мережі гідрографії басейну є топографічні карти, доповнені матеріалами великомасштабних аерофотознімків. На основі аналізу цих відомостей басейн річки розбивається на ділянки, на границях яких позначаються постійні створи. Ділянки визначаються за усередненими гідравлічними і морфологічними характеристиками річки. За нульовий створ береться найближчий до витoku річки (сформованого потоку). Площа водозбору ( $F$ ) визначається шляхом зняття з топографічної карти горизонталей поверхневого стоку, що передують кожному постійному створу.

У процесі складання прогнозу про можливу обстановку повинні бути визначені наступні показники: площа затоплення; кількість населених пунктів, що потрапили в зону затоплення; ступені та якісні характеристики пошкоджень будівель житлового фонду (до ступенів пошкоджень будівель слід відносити важкі пошкодження, помірні та слабкі); чисельність населення та його втрати; протяжність пошкоджених комунально-енергетичних мереж; протяжність пошкоджених мостів; протяжність пошкоджених захисних гребель; кількість худоби та її втрати; посівні площі, що стали непридатними внаслідок затоплення; обсяги та трудомісткість необхідних аварійно-рятувальних робіт.

На основі даних можливої обстановки в зоні затоплення необхідно створювати угруповання сил ліквідації наслідків повені, які здатні: провести розвідку зони затоплення; провести рятування постраждалого населення; організувати будівництво пунктів посадки і висадки постраждалого населення зі всіх видів транспорту; організувати відновлення автомобільних доріг і залізничних магістралей; організувати відновлення пошкоджених і будівництво нових мостів; організувати відновлення пошкоджених і будівництво нових захисних гребель; організувати відновлення комунально-енергетичних мереж і ліній зв'язку; організувати порятунок і поховання загиблої худоби.

Для виконання вищезазначених завдань у зонах затоплень доцільно створювати наступні формування:

- для організації розвідки – групи загальної розвідки; групи інженерної розвідки; ланки повітряної розвідки; ланки річкової розвідки; ланки розвідки на залізничному транспорті;

- для проведення рятувальних робіт – рятувальні команди (групи) на плавзасобах; санітарні дружини;

- для відновлення зруйнованих і будівництва нових гребель створювати команди по захисту гребель (КЗГ) у складі: особовий склад – 35 осіб; екскаватор – 1; бульдозер – 1; каток – 1; автосамоскиди – 2; автомашини – 2;

- для відновлення пошкоджених доріг – створювати команди відновлення шляхів (КВШ) у складі: особовий склад – 35 осіб; екскаватор – 1; бульдозери – 2; грейдер – 1; автосамоскиди – 2; автомашини – 2;



– для ремонту і відновлення зруйнованих мостів та будівництва причалів створювати команди по захисту мостів (КЗМ) у складі: особовий склад – 25 осіб; автокран – 1; бульдозер – 1; екскаватор – 1; копер – 1; автомобілі – 2; мотопили – 2;

– для ліквідації наслідків на КЕС і лініях зв'язку створювати аварійно-технічні команди за видами комунікацій;

– для поховання загиблої худоби створювати бригади по захисту тварин у складі: особовий склад – 10 осіб; екскаватор – 1; бульдозер – 1; автомобіль – 1.

Формування створюються на базі об'єктів економіки, спеціалізованих підприємств і підрозділів цивільного захисту. Кількісний склад визначається виходячи з обсягів робіт та можливостей формувань.

При прогнозуванні гідрологічних і морфологічних характеристик опади ( $X$ , мм) розподіляються за площею водозбору з урахуванням коефіцієнта поглинання ( $n$ ) і створюють шар стоку ( $Y$ , мм), рівномірно розподілений по площі водозбору – об'єм стоку. Тому розрахункове русло річок, в якому поширюються потоки хвиль паводку, мають схематизуватися у вигляді складених русел, що складаються з окремих призматичних розрахункових ділянок узагальненого профілю з усередненими гідравлічними і морфологічними характеристиками.

Відстань між однозначними горизонталями місцевості, розташованими по обох боках річок по всій довжині ділянок, приймається для складання оперативних розрахунків у середньому однаковою.

За нульові створи береться перший (найближчий до потоку) з намічених постійних створів.

Для здійснення обчислень розглядається розрахунковий багатоводний рік з вибраною відсотковою забезпеченістю ( $P$ , %).

Вибір розрахункових постійних створів здійснюється по карті області.

Гідрологічні та морфологічні характеристики постійних створів річок визначаються за даними геолого-географічного опису місцевості та топографічною картою області, до яких відносяться:

–  $F^i$  – площа водозбору  $i$ -го постійного створу, км<sup>2</sup>;

–  $H^{i\bar{0}}$  – глибина побутового потоку, м;

–  $V^{i\bar{0}}$  – швидкість течії побутового потоку, м/с;

–  $B^{i\bar{0}}$  – ширина побутового потоку, м;

–  $L^0$  – віддаленість 0-го створу від джерела річки, км;

–  $L^{i-0}$  – віддаленість  $i$ -го створу від 0-го створу, км;

–  $L^{i-1}$  – віддаленість попереднього створу від 0-го створу, км;

–  $Z^{i\bar{0}}$  – відмітка урізання води побутового потоку, м;

–  $k$  – показник форми долини річок;

–  $n$  – коефіцієнт поглинання (стоку) дощових вод;

–  $X$  – максимальні добові опади, що спостерігаються в басейні річки, за даними багаторічних спостережень.

Визначення гідрологічних і морфологічних характеристик річок.

Для 0-го створу

Визначення об'єму стоку дощових вод ( $W^0$ ):

$$W^0 = XF^0 n, \text{ м}^3. \quad (3.1)$$

Визначення максимальної глибини затоплення ( $H$ ):

$$H^{0m} = H^{0б} \left( \tau \frac{Q^{0m}}{Q^{0б}} \right)^{\frac{1}{k+1,667}}, \text{ м} \quad (3.2)$$

де  $\tau$  – коефіцієнт шорсткості русла при виході води у пойму.

Визначення висоти хвиль паводку ( $H^{0Г}$ ):

$$H^{0Г} = H^{0m} - H^{0б}, \text{ м}. \quad (3.3)$$

Визначення часу добігання фронту хвилі до 0-го створу ( $T^{0ф}$ ):

$$T^{0ф} = 0, \quad (3.4)$$

оскільки розрахунок руху хвилі розпочинається від зазначеного створу.

Визначення швидкості руху гребеня хвилі ( $V^{0z}$ ):

$$V^{0z} = \frac{V^{0б}}{\tau} \left( \frac{H^{0m}}{H^{0б}} \right)^{0,667} \text{ м/с}. \quad (3.5)$$

Визначення часу добігання гребеня хвилі до 0-го створу ( $T^{0z}$ ):

$$T^{0z} = \frac{0,33L^0}{3,6V^{0z}}, \text{ год}. \quad (3.6)$$

Визначення часу добігання хвоста хвилі до 0-го створу ( $T^{0x}$ ):

$$T^{0x} = \frac{4,324W^0}{3,6 \cdot Q^{0m} k^{0,667}}, \text{ год}. \quad (3.7)$$

Визначення максимальної швидкості течії потоку в 0-му створі ( $V^{0m}$ ):

$$V^{0m} = \sqrt{\frac{9,81H^{0m}}{2(k+1)}}, \text{ м/с.} \quad (3.8)$$

Визначення максимальної ширини потоку у створі ( $B^{0m}$ ):

$$B^{0m} = B^{o\delta} e^{k \ln\left(\frac{H^{0m}}{H^{im}}\right)}, \text{ м.} \quad (3.9)$$

Для  $i$ -го створу

Визначення витрати побутового потоку в створі ( $Q^{i\delta}$ ):

$$Q^{i\delta} = \frac{H^{i\delta} B^{i\delta} V^{i\delta}}{(k+1)\tau}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (3.10)$$

Визначення довжини  $j$ -ї ділянки річки ( $L^j$ ):

$$L^j = L^{i-0} - L^{i-1}, \text{ км.} \quad (3.11)$$

Визначення швидкості руху фронту хвилі на  $j$ -й ділянці ( $C^{i\phi}$ ) до  $i$ -го створу:

$$C^{i\phi} = \sqrt{\frac{9,81H^{i\delta}}{(k+1)}}, \text{ м/с.} \quad (3.12)$$

Визначення часу добігання фронту хвилі до  $i$ -го створу ( $T^{i\phi}$ ):

$$T^{i\phi} = T^{(i-1)\phi} + \frac{2L^j}{3,6(V^{(i-1)\delta} + C^{i\phi})}, \text{ год.} \quad (3.13)$$

Визначення часу добігання хвоста хвилі ( $T^{ix}$ ):

$$T^{ix} = T^{(i-1)\phi} + \frac{2L^j}{3,6V^{i\delta}}, \text{ год.} \quad (3.14)$$

Визначення тривалості затоплення в  $i$ -му створі ( $T^i$ ):

$$T^i = T^{ix} - T^{i\phi}, \text{ год.} \quad (3.15)$$

Визначення об'єму стоку в  $i$ -му створі з площі водозбору ( $W^i$ ):

$$W^i = XF^i n, \text{ м}^3. \quad (3.16)$$

**Визначення максимальної витрати в  $i$ -му створі:**

$$Q^{im} = \frac{2W^i}{3,6T^i} \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.17)$$

Визначення максимальної глибини затоплення в  $i$ -му створі:

$$H^{im} = H^{i\delta} \left( \tau \frac{Q^{im}}{Q^{i\delta}} \right)^{\frac{1}{k+1,667}} \text{ м}. \quad (3.18)$$

Визначення висоти хвиль паводку у створі:

$$H^{iz} = H^{im} - H^{i\delta}, \text{ м}. \quad (3.19)$$

Визначення швидкості руху гребеня хвилі:

$$C^{iz} = 0,65V^{i\delta} \left( \frac{H^{im}}{H^{i\delta}} \right)^{\frac{2}{3}}, \text{ м/с}. \quad (3.20)$$

Визначення максимальної швидкості течії у створі:

$$V^{im} = \sqrt{\frac{9,81H^{im}}{2(k+1)}}, \text{ м/с}. \quad (3.21)$$

Визначення середньої приведеної ширини побутового потоку на  $j$ -й ділянці:

$$B_{j\delta}^{cp} = \frac{B^{i\delta} + B^{(i-1)\delta}}{2}, \text{ м}. \quad (3.22)$$

Визначення середньої приведеної максимальної ширини на ділянці:

$$B_{im}^{cp} = B_{j\delta}^{cp} e^{k \ln \left( \frac{H^{im}}{H^{i\delta}} \right)}, \text{ м.} \quad (3.23)$$

Визначення площі затоплення на  $j$ -й ділянці:

$$S^j = \frac{B^{im} L^j}{1000}, \text{ км}^2. \quad (3.24)$$

Визначення загальної площі затоплення ділянок річок:

$$S^{zam} = \sum_{j=1}^n S^j, \text{ км}^2. \quad (3.25)$$

Визначення відмітки урізання води в  $i$ -му створі за умов максимальній глибині затоплення:

$$Z^{im} = Z^{i\delta} + H^{i\delta}, \text{ м.} \quad (3.26)$$

Для обчислення гідрологічних характеристик паводкової хвилі в будь-якому (змінному) створі, що знаходиться між двома постійними, використовується складений графік руху паводкової хвилі за методом лінійної інтерполяції.

Необхідними умовами складання графіка є:

- наявність даних не менш ніж за чотирима постійними створами середніх і великих річок та за двома постійними створами малих річок;
- проведення розрахунку гідрологічних характеристик (за графіками довгострокових прогнозів);
- перший створ необхідно вибрати на відстані не менш чотири годинного добігання хвилі від 0-го створу.

*Розрахунок сил, що мають виконувати аварійно-рятувальні роботи в разі виникнення повеней*

#### А. Рятувальні роботи

1. Визначення сил розвідки (кількості ланок річкової розвідки):

$$N_{zpp} = N_{zpp}^{жз} + N_{zpp}^{pn}, \text{ ланок} \quad (3.27)$$

де  $N_{zpp}$  – загальна кількість ланок річкової розвідки;  $N_{zpp}^{жз}$  – кількість ланок річкової розвідки для організації розвідки затопленої міської житлової зони;  $N_{zpp}^{pn}$  – кількість ланок річкової розвідки для організації розвідки річкових напрямків;

$$N_{zpp}^{жз} = 8,4 k_q k_n \frac{S_{zat}^{жз}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{ланка}}, \text{ ланок}, \quad (3.28)$$

де  $8,4$  – трудомісткість по розвідці  $1 \text{ км}^2$  затопленої міської житлової зони, осіб·год/км<sup>2</sup>;  $S_{zat}^{жз}$  – площа затопленої міської житлової зони, км<sup>2</sup>;  $n_{змін}$  – кількість змін ( $n_{змін} = 2$  зміни);  $T$  – тривалість ведення розвідки, годин;  $n_{ланка}$  – чисельність особового складу ланки річкової розвідки ( $n_{ланка} = 4$  особи);  $k_q$  – коефіцієнт часу доби ( $k_q = 1,5$ );  $k_n$  – коефіцієнт підводних умов ( $k_n = 1,25$ );

$$N_{зрр}^{рн} = 28 \cdot 10^{-2} k_q k_n \frac{L_{zat}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{ланка}}, \text{ ланок}, \quad (3.29)$$

де  $28 \cdot 10^{-2}$  – трудомісткість розвідки  $1 \text{ км}$  річкового напрямку, осіб·год./км;  $L_{zat}$  – протяжність затоплення, км.

Для ведення повітряної розвідки (на базі розрахунку гелікоптера):

$$N_{зрр}^{пр} = 13 \cdot 10^{-3} k_n \frac{S_{zat}^{жз}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{ланка}}, \text{ ланок}, \quad (3.30)$$

де  $13 \cdot 10^{-3}$  – трудомісткість розвідки екіпажем гелікоптера  $1 \text{ км}^2$  затопленої території, осіб·год/км<sup>2</sup>.

2. Сили охорони громадського порядку (ОГП) на плавзасобах:

$$N_{ОГП}^{Груп} = 3,3 \cdot 10^{-3} N_{zat}^{МН}, \text{ груп ОГП}, \quad (3.31)$$

де  $3,3 \cdot 10^{-3}$  – кількість груп ОГП, необхідних для рятування однієї людини, що потрапила в зону затоплення, груп/особа;  $N_{zat}^{МН}$  – кількість міського населення, яке потрапило в зону повені, осіб.

3. Сили безпосереднього порятунку міського населення, яке потрапило в зону повені на плавзасобах:

$$N_{Рятув.}^{Груп} = 3,3 \cdot 10^{-3} N_{zat}^{МН}, \quad (3.32)$$

де  $N_{Рятув.}^{Груп}$  – кількість рятувальних груп;  $3,3 \cdot 10^{-3}$  – кількість рятувальних груп на одного врятованого, груп/особа;  $N_{zat}^{МН}$  – кількість міського населення, яке потрапило в зону повені, осіб.

4. Сили надання першої медичної допомоги:

$$N_{Санітарн.}^{Дружин} = 3,3 \cdot 10^{-3} N_{Санітарн.}^{МН}, \quad (3.33)$$

де  $N_{\text{Санітарн.}}^{\text{Дружин}}$  – кількість санітарних дружин;  $3,3 \cdot 10^{-3}$  – кількість санітарних дружин на одну особу санітарних втрат, санітарних дружин/особа;  $N_{\text{Санітарн.}}^{\text{MH}}$  – санітарні втрати міського населення, осіб:

$$N_{\text{Санітарн.}}^{\text{MH}} = 5 \cdot 10^{-2} N_{\text{zat}}^{\text{MH}}, \quad (3.34)$$

причому коефіцієнти (пп. 2, 3, 4) отримані з розрахунку: одне формування на 300 людей.

Кількість формувань для виконання відповідних робіт у разі виникнення повені у сільській місцевості (вирази (3.27), (3.31), (3.32) та (3.33)) визначається наступним чином: одне формування на один затоплений населений пункт.

5. Розрахунок потрібної кількості плавзасобів для евакуації населення із зони затоплення (з пунктів збору потерпілих):

$$k_{\text{ПЗ}}^{\text{Евакуація}} = \frac{k_u k_n k_v}{T} \sum_{i=1}^m \frac{N_{\text{ПЗ}_i}^{\text{Насел.}}}{N_{\text{ПЗ}_i}} R_i^{\text{ПЗ}}, \quad (3.35)$$

де  $k_{\text{ПЗ}}^{\text{Евакуація}}$  – кількість плавзасобів, необхідних для евакуації;  $N_{\text{ПЗ}_i}^{\text{Насел.}}$  – кількість населення, евакуйованого  $i$ -тим видом плавзасобу, осіб;  $m$  – кількість видів плавзасобів;  $N_{\text{ПЗ}_i}$  – місткість  $i$ -го виду плавзасобу, осіб;  $R_i^{\text{ПЗ}}$  – тривалість рейсу  $i$ -го виду плавзасобу.

$$R_i^{\text{ПЗ}} = \frac{2L_{\text{Евакуація}}}{V_i^{\text{ПЗ}}} (1 + 0,3V_{\text{ВП}}) + t_{\text{ЗВ}_i}^{\text{ПЗ}}, \text{ хв.}, \quad (3.36)$$

де  $L_{\text{Евакуація}}$  – довжина маршруту евакуації, м;  $V_i^{\text{ПЗ}}$  – швидкість руху  $i$ -го плавзасобу по воді, м/хв.;  $V_{\text{ВП}}$  – швидкість водного потоку, м/с;  $t_{\text{ЗВ}_i}^{\text{ПЗ}}$  – час, необхідний на завантаження і вивантаження  $i$ -го плавзасобу, хв.;  $T$  – тривалість евакуації (рятувальних робіт), хв.;  $k_v$  – коефіцієнт використання транспортних засобів ( $k_v = 1,2$ ).

При розрахунку потрібної кількості плавзасобів для евакуації тварин із зони затоплення необхідно використовувати цю ж залежність, приймаючи відношення  $N_{\text{Евакуація}}^{\text{Тварин}} / N_{\text{ПЗ}}^{\text{Тварин}}$ .

Орієнтовна продуктивність рейсу переправно-десантних засобів і паромів можна приймати за таблицею 3.1.

б. Розрахунок потрібної кількості автомобільного транспорту для перевезення постраждалого населення від урізання (межі) затоплення в райони розселення:

$$N_{AT}^{Евакуація} = \frac{k_ч k_n k_в}{T} \sum_{j=1}^m \frac{N_{AT_j}^{Насел.}}{N_{AT_j}} R_j^{AT}, \quad (3.37)$$

де  $N_{AT}^{Евакуація}$  – кількість автотранспорту, необхідного для перевезення постраждалого населення;  $N_{AT_j}^{Насел.}$  – кількість постраждалого населення, що перевозиться  $j$ -тим видом автотранспорту, осіб;  $N_{AT_j}$  – місткість  $i$ -го виду автотранспорту, осіб;  $R_j^{AT}$  – тривалість рейсу  $i$ -го автотранспорту, год.

Таблиця 3.1 – Орієнтовна продуктивність рейсу переправно-десантних засобів і паромів\*

Швидкість течії, м/с	Тривалість рейсу $R^{ПЗ}$ за умов довжини маршруту евакуації, м						
	100	150	200	250	300	400	500
Переправно-десантні засоби							
до 0,5	7	7	8	9	10	11	12
0,5–1,0	7	8	9	10	12	13	15
1,0–1,5	8	9	10	11	13	14	16
1,5–2,0	8	10	11	13	15	18	20
2,0–2,5	9	12	14	16	18	22	26
2,5–3,0	11	14	17	20	22	28	34
Пароми з понтонного парку							
до 0,5	10	11	12	13	14	15	16
0,5–1,0	10	11	13	14	15	16	18
1,0–1,5	11	12	14	15	16	18	20
1,5–2,0	12	13	15	16	18	22	25
2,0–2,5	13	15	17	20	22	26	36
2,5–3,0	15	18	22	25	28	35	44

\* при визначенні приблизної місткості плавзасобу можна виходити з наступної норми площі: для людини – 0,3 м<sup>2</sup>/особу; для великої рогатої худоби – 1,5 м<sup>2</sup>/тварину; для дрібної рогатої худоби – 0,3 м<sup>2</sup>/тварину.

Примітка: у виразах (3.35) і (3.37)  $\sum_i N_{ПЗ_i}^{Насел.}$  та  $\sum_j N_{AT_j}^{Насел.}$  повинні бути рівними загальній чисельності населення (тварин), що потрапили в зону повені.

Для реалізації положень, викладених у пунктах 1–6, необхідно підготувати наступні дані щодо:



- кількості міського населення, яке потрапило в зону затоплення;
- площі затоплення міської забудови;
- кількості населених пунктів сільської місцевості, які потрапили в зону затоплення;
- кількості тварин, які потрапили в зону затоплення.

Кількість міського населення, яке потрапило в зону затоплення  $N_{zat}^{Насел.}$  :

$$N_{zat}^{Насел.} = S_{zat}^{жз} q^{Насел.}, \text{ осіб.} \quad (3.38)$$

де  $q^{Насел.}$  – щільність населення міської забудови, осіб/км<sup>2</sup> (за статистичними даними);

$$S_{zat}^{жз} = l_{zat}^{жз} b_{zat}^{жз}, \text{ км}^2, \quad (3.39)$$

де  $l_{zat}^{жз}$  – довжина затопленої міської забудови (для прогнозу може дорівнювати довжині міста уздовж річки), км;  $b_{zat}^{жз}$  – ширина затопленої міської забудови:

$$b_{zat}^{жз} = \frac{H - h_1}{\text{tg} \alpha_1} - l_1, \text{ км}, \quad (3.40)$$

де  $H$  – максимальна висота паводку у створі міста;  $h_1$  – висота берега від урізання води;  $\alpha_1$  – кут ухилу місцевості у створі міста;  $l_1$  – горизонтальна відстань від берега до міської забудови, км.

Вираз (3.40) є справедливим у випадку розташування міста на одному березі річки.

При  $b_{zat}^{жз} \leq l$  місто не затоплюється.

У випадку розташування міста по обох берегах ширина затоплення визначається наступним чином:

$$b_{zat}^{жз} = \frac{H - h_1}{\text{tg} \alpha_1} - l_1 + \frac{H - h_2}{\text{tg} \alpha_2} - l_2, \text{ км}, \quad (3.41)$$

де  $h_2$  – висота другого берега від урізання води;  $\alpha_2$  – кут ухилу місцевості другого берега;  $l_2$  – горизонтальна відстань від берега до міської забудови на другому березі, км.

Значення показників  $h$ ,  $l$  і  $\alpha$  у виразах (3.40) та (3.41) визначаються за планом місцевості або безпосереднім виміром.

Стан населених пунктів сільської місцевості визначається за топографічною картою після нанесення на неї межі затоплення. В разі потрапляння населеного пункту до меж затоплення характер і площа затоплення цього населеного пункту визначається за методологією міста з використанням виразів (3.38)÷(3.41).

Кількість населення сільської місцевості, яке потрапило в зону затоплення, визначається за статистичними даними.

Чисельність сільськогосподарських тварин, які потрапили в зону затоплення, визначається так само, як і чисельність населення.

Втрати сільськогосподарських тварин, які потрапили в зону затоплення, можуть скласти:

великої рогатої худоби	$P_{BPH} = 0,02 N_{BPH}$ , голів;
дрібної рогатої худоби	$P_{DPH} = 0,02 N_{DPH}$ , голів;
свиней	$P_{CB} = 0,02 N_{CB}$ , голів;

де  $N_{BPH}$ ,  $N_{DPH}$ ,  $N_{CB}$  – відповідно чисельність тварин, які потрапили в зону затоплення.

## Б. Аварійно-відновлювальні роботи

1. Визначення сил відновлення магістральних ліній електропередачі (ЛЕП):

$$N_{ATK}^{ЛЕП} = 375 k_{\text{ч}} k_n \frac{N_{\text{zat}}^{HP} l_{HP}^{ЛЕП}}{T} \cdot \frac{n_{\text{змін}}}{n_{ATK}}, \quad (3.42)$$

де  $N_{ATK}^{ЛЕП}$  – кількість аварійно-технічних команд, які необхідні для відновлення ЛЕП; 375 – трудомісткість відновлення 1 км зруйнованої ЛЕП, осіб/год.;  $N_{\text{zat}}^{HP}$  – кількість затоплених населених пунктів;  $l_{HP}^{ЛЕП}$  – довжина зруйнованих ЛЕП, що припадає на один затоплений населений пункт ( $l_{HP}^{ЛЕП} \approx 1,5...2,5$  км/зат.н.п.);  $n_{ATK}$  – чисельність однієї аварійно-технічної команди ( $\approx 25$  осіб).

2. Визначення сил відновлення магістральних кабельних ліній зв'язку (КЛЗ):

$$N_{K3}^{КЛЗ} = 100 k_{\text{ч}} k_n \frac{N_{\text{zat}}^{HP} l_{HP}^{КЛЗ}}{T} \cdot \frac{n_{\text{змін}}}{n_{K3}}, \quad (3.43)$$

де  $N_{КЗ}^{КЛЗ}$  – кількість команд зв'язку, які необхідні для відновлення КЛЗ; 100 – трудомісткість відновлення 1 км. кабельних ліній зв'язку, осіб/год.;  $l_{НП}^{КЛЗ}$  – довжина зруйнованих кабельних ліній зв'язку, що припадає на один затоплений населений пункт ( $l_{НП}^{КЛЗ} \approx 1,5...2,5$  км/зат.н.п.).

3. Визначення сил ліквідації аварій на комунально-енергетичних мережах затопленої території міста:

$$N_{АТК}^{EM} = 30k_q k_n \frac{N_{Аварія}^{EM}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{АТК}}, \quad (3.44)$$

де  $N_{Аварія}^{EM}$  – кількість аварій на енергетичних мережах:

$$N_{Аварія}^{EM} = 1,75S_{зат}^{Місто}, \quad (3.45)$$

де 1,75 – кількість аварій на енергетичних мережах, що припадають на 1 км<sup>2</sup> затопленої частини міста, аварії/км<sup>2</sup>;  $N_{АТК}^{EM}$  – кількість аварійно-технічних команд для ліквідації аварії на енергетичних мережах ( $n_{АТК} = 24$  особи);

$$N_{АТК}^{ВПМ} = 30k_q k_n \frac{N_{Аварія}^{ВПМ}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{АТК}}, \quad (3.46)$$

де  $N_{АТК}^{ВПМ}$  – кількість аварійно-технічних команд для ліквідації аварії на водопровідних мережах ( $n_{АТК} = 25$  осіб);  $N_{Аварія}^{ВПМ}$  – кількість аварій на водопровідних мережах:

$$N_{Аварія}^{ВПМ} = 1,25S_{зат}^{Місто}, \quad (3.47)$$

де 1,25 – кількість аварій на водопровідних мережах, що припадають на 1 км<sup>2</sup> затопленої частини міста, аварії/км<sup>2</sup>;

$$N_{АТК}^{KM} = 30k_q k_n \frac{N_{Аварія}^{KM}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{АТК}}, \quad (3.48)$$

де  $N_{АТК}^{KM}$  – кількість аварійно-технічних команд для ліквідації аварій на каналізаційних мережах ( $n_{АТК} = 25$  осіб);  $N_{Аварія}^{KM}$  – кількість аварій на каналізаційних мережах:

$$N_{\text{Аварія}}^{KM} = 1,25 S_{\text{зат}}^{\text{Місто}}, \quad (3.49)$$

де  $1,25$  – кількість аварій на каналізаційних мережах, що припадають на  $1 \text{ км}^2$  затопленої частини міста, аварії/км<sup>2</sup>;

$$N_{\text{АТК}}^{TM} = 30 k_u k_n \frac{N_{\text{Аварія}}^{TM}}{T} \cdot \frac{n_{\text{змін}}}{n_{\text{АТК}}}, \quad (3.50)$$

де  $N_{\text{АТК}}^{TM}$  – кількість аварійно-технічних команд для ліквідації аварій на теплових мережах ( $n_{\text{АТК}} = 25$  осіб);  $N_{\text{Аварія}}^{TM}$  – кількість аварій на теплових мережах:

$$N_{\text{Аварія}}^{TM} = 0,75 S_{\text{зат}}^{\text{Місто}}, \quad (3.51)$$

де  $0,75$  – кількість аварій на теплових мережах, що припадають на  $1 \text{ км}^2$  затопленої частини міста, аварії/км<sup>2</sup>.

У виразах (3.44), (3.46), (3.48) та (3.50) коефіцієнт  $30$  – це трудомісткість ліквідації однієї аварії, осіб/год.

#### 4. Визначення сил улаштування пунктів посадки (висадки):

а) для улаштування сходнів (завдовжки 20 м) на території міста:

$$N_{\text{КЗМ}}^{\text{Сходні}} = k_u k_n \frac{10}{300} \cdot \frac{N_{\text{зат}}^{MH}}{T} \cdot \frac{n_{\text{змін}}}{n_{\text{КЗМ}}}, \quad (3.52)$$

де  $N_{\text{КЗМ}}^{\text{Сходні}}$  – кількість команд захисту мостів для улаштування сходнів ( $n_{\text{КЗМ}} = 25$  осіб);  $300$  – чисельність населення затопленої території міста, на якій повинна бути обладнана одна сходня, осіб;  $10$  – трудомісткість виготовлення однієї сходні, осіб/год.;

б) для улаштування причалів (у вигляді берегової частини низьководного моста на дерев'яних опорах)  $20 \times 6$  м:

$$N_{\text{КЗМ}}^{\text{Причал}} = 100 k_u k_n \frac{N_{\text{зат}}^{MH}}{T} \cdot \frac{n_{\text{змін}}}{n_{\text{КЗМ}}}, \quad (3.53)$$

де  $N_{\text{КЗМ}}^{\text{Причал}}$  – кількість команд по захисту мостів для улаштування причалів з розрахунку один причал на один затоплений населений пункт ( $n_{\text{КЗМ}} = 25$  осіб);  $100$  – трудомісткість обладнання одного причалу, осіб/год.

5. Визначення сил на відновлення і будівництво захисних дамб:

$$N_{ДВК}^{Дамба} = 2,5k_{ч}k_{н} \frac{L^{Дамба}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{ДВК}}, \quad (3.54)$$

де  $N_{ДВК}^{Дамба}$  – кількість дорожньо-відновлювальних команд ( $n_{ДВК} = 35$  осіб);  
 2,5 – трудомісткість зведення одного погонного метра (п.м) дамби, осіб/год.;  
 $L^{Дамба}$  – довжина відновлення (зведення нових) дамб, п.м.

6. Визначення сил на відновлення зруйнованих доріг:

$$N_{ДВК}^{Дорога} = 300k_{ч}k_{н} \frac{L^{Дорога}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{ДВК}}, \quad (3.55)$$

де  $N_{ДВК}^{Дорога}$  – кількість дорожньо-відновлювальних команд ( $n_{ДВК} = 35$  осіб);  
 300 – трудомісткість відновлення одного погонного км доріг, осіб/год.;  
 $L^{Дорога}$  – довжина зруйнованих доріг, км:

$$L^{Дорога} = 5N_{зат}^{НП}, \text{ км.} \quad (3.56)$$

7. Визначення сил, необхідних для поховання загиблої худоби:

$$N_{БЗТ}^{ВРХ} = 0,4k_{ч}k_{н} \frac{P_{ВРХ}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{БТЗ}}, \quad (3.57)$$

де  $N_{БЗТ}^{ВРХ}$  – кількість бригад захисту тварин для поховання великої рогатої худоби ( $n_{БТЗ} = 10$  осіб); 0,4 – трудомісткість поховання однієї тварини великої рогатої худоби, осіб/год.;  $P_{ВРХ}$  – кількість великої рогатої худоби, що загибла.

$$N_{БЗТ}^{ДРХ} = 0,13k_{ч}k_{н} \frac{(P_{ДРХ} + P_{СВ})}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{БТЗ}}, \quad (3.58)$$

де  $N_{БЗТ}^{ДРХ}$  – кількість бригад захисту тварин для поховання дрібної рогатої худоби та свиней; 0,13 – трудомісткість поховання однієї тварини дрібної рогатої худоби, осіб/год.;  $P_{ДРХ}$  – кількість дрібної рогатої худоби, що загибла;  $P_{СВ}$  – кількість свиней, що загибла.

8. Визначення сил відновлення зруйнованих мостів:

$$N_{K3M}^{Mocm} = 12k_чk_n \frac{N_{zat}^{HI} \bar{L}^{Mocm}}{T} \cdot \frac{n_{змін}}{n_{K3M}}, \quad (3.59)$$

де  $N_{K3M}^{Mocm}$  – кількість команд, необхідних для відновлення зруйнованих мостів;  $12$  – трудомісткість відновлення одного погонного метра моста, осіб/год.;  $\bar{L}^{Mocm}$  – середня довжина мостів, що потрапили в зону затоплення (загальна довжина зруйнованих мостів приймається із розрахунку: один міст на один затоплений населений пункт).

### 3.2 Інженерна обстановка в разі катастрофічного затоплення внаслідок руйнування гідротехнічних споруд

До основних гідротехнічних споруд, руйнування яких призводить до гідродинамічних аварій, відносяться дамби, водозабірні й водозбірні споруди (шлюзи). Катастрофічне затоплення, що є наслідком гідродинамічної аварії, полягає у стрімкому затопленні місцевості хвилею прориву. Масштаби наслідків гідродинамічних аварій залежать від параметрів і технічного стану гідровузла, характеру і ступеня руйнування дамби, об'ємів запасів води у водосховищі, характеристик хвилі прориву і катастрофічної повені, рельєфу місцевості, сезону і часу доби, багатьох інших чинників.

Основними чинниками ураження катастрофічного затоплення є хвиля прориву (висота хвилі, швидкість руху) і тривалість затоплення.

*Хвиля прориву* – це хвиля, що утворюється у фронті потоку води, яка спрямовується у пролам, та має, як правило, значну висоту гребеня і швидкість руху, має велику руйнівну силу.

Хвиля прориву, з гідравлічної точки зору, є хвилею переміщення, яка, на відміну від вітрових хвиль, що виникають на поверхнях великих водоймищ, є здатною переносити у напрямку свого руху значні маси води. Тому хвилю прориву слід розглядати як певну масу води, що рухається вниз по річці та безперервно змінює свою форму, розміри та швидкість.

Схематично переріз сформованої хвилі показано на рис. 3.1, де  $h$  – побутовий рівень води в річці;  $H_B$  – висота хвилі;  $H$  – висота потоку.

Початок хвилі називається *фронтом хвилі*, який, переміщуючись із великою швидкістю, висувається вперед. Фронт хвилі може бути дуже крутим, за умов переміщення великих хвиль на ділянках, які близько розташовані від зруйнованого гідровузла, і відносно пологим на великих відстанях від гідровузла.

Зона найбільшої висоти хвилі називається *гребенем хвилі*, який рухається, як правило, повільніше, ніж її фронт. Ще повільніше рухається кінець хвилі – *хвіст хвилі*. Унаслідок відмінності швидкостей цих трьох характерних точок хвиля поступово розтягується по довжині річки, відповідно зменшуючи свою висоту і збільшуючи тривалість проходження. При цьому, залежно від висоти хвилі та ухилів річки на різних ділянках, а також неоднакової форми і шорсткості русла, може спостерігатися деяке тимчасове прискорення руху

гребеня, з «перекосом» хвилі, тобто з відносним укороченням зони підйому, в порівнянні із зоною спаду.

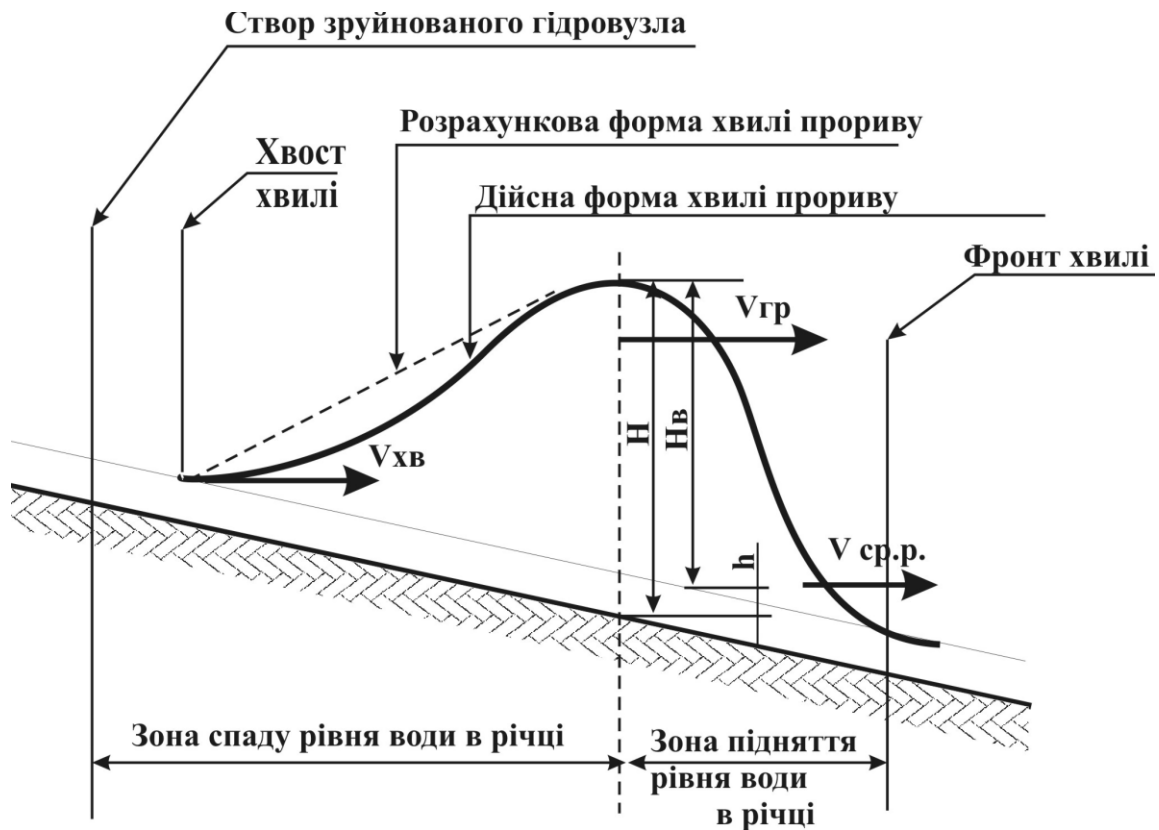


Рисунок 3.1 – Схематичний переріз хвилі прориву

Оскільки хвиля прориву є основним чинником ураження у випадку руйнування гідротехнічної споруди, то для визначення інженерної обстановки необхідно визначити її параметри: висоту хвилі – ( $H_B$ ), глибину потоку – ( $H$ ), швидкість руху і час добігання різних характерних точок хвилі (фронту, гребеня, хвоста) до розрахункових створів, розташованих на річці нижче гідровузла ( $V_{\text{фронт}}$ ,  $V_{\text{гребень}}$ ,  $V_{\text{хвіст}}$  та  $t_{\text{фронт}}$ ,  $t_{\text{гребень}}$ ,  $t_{\text{хвіст}}$ ), а також тривалість проходження хвилі через вказані створи – ( $T$ ), яка дорівнює сумі часу підйому рівнів – ( $T_{\text{підйом}}$ ) і часу спаду – ( $T_{\text{спад}}$ ), або різниці між ( $t_{\text{хвіст}}$  і  $t_{\text{гребень}}$ ).

Початковими даними для розрахунків параметрів хвилі прориву є:

– об'єм водосховища ( $W_{\text{водосховищ}}$ ):

$$W_{\text{водосховищ}} = \frac{1}{3} H_{\text{водосховищ}} S_{\text{водосховищ}}, \text{ МЛН. М}^3 \quad (3.60)$$

де  $H_{\text{водосховищ}}$  – глибина водосховища у дамби, м;  $S_{\text{водосховищ}}$  – площа дзеркала водосховища (площа затоплення),  $\text{м}^2$ ;

– ширина водосховища перед дамбою –  $B_{\text{водосховищ}}$ , м;

- глибина водосховища перед дамбою –  $H_{\text{водосховищ}}$ , м;
- глибина річки за дамбою –  $h_{\text{річка}}$ , м;
- відмітка рівня води водосховища перед дамбою –  $U_{\text{водосховищ}}$ , м;
- відмітка рівня води в річці за дамбою –  $U_{\text{річка}}$ , м;
- ухил дна річки –  $i$ :

$$i = \frac{\bar{B}_{\text{річка}} h_{\text{річка}}^2}{W_{\text{водосховищ}} M(M+1)}, \quad (3.61)$$

де  $M$  – параметр, що характеризує форму поперечного перерізу річки та приймається відповідно до рисунка 3.2;  $\bar{B}_{\text{річка}}$  – середня ширина річки, яка відповідає  $h_{\text{річка}}$ ;

- ширина прориву –  $B_{\text{прорив}}$ , м;
- коефіцієнт шорсткості річки  $h$ , який приймається відповідно до табл. 3.2.

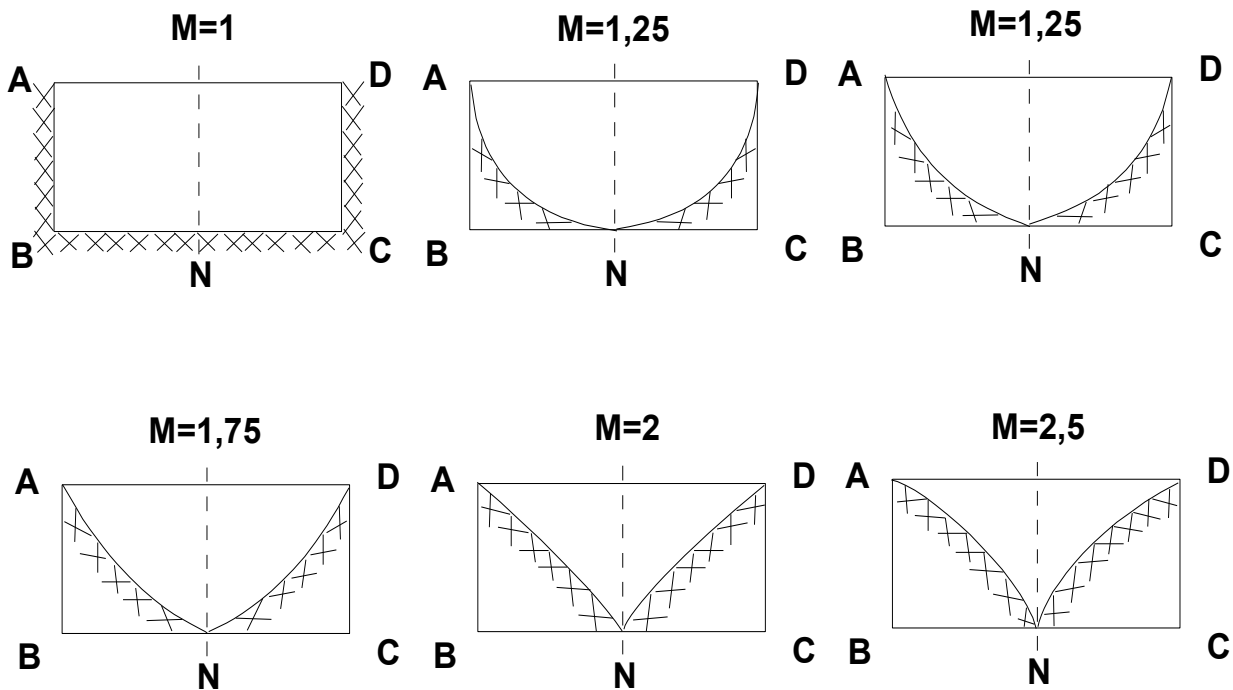


Рисунок 3.2 – Форма поперечного перерізу русла річки

При розрахунку параметрів хвилі прориву приймаються наступні припущення:

- руйнування гідровузла, або його частини, відбувається миттєво;
- ступінь руйнування напірного фронту (лінії споруд), що підтримують натиск гідровузла, приймається у відсотках (або в долях) від його довжини по



урізання води у водосховищі. При часткових руйнуваннях вважається, що пролам утворюється один і знаходиться в найглибшому місці;

– глибина проламу вважається такою, що доходить до дна водосховища;

– зміна проламу в часі не враховується, його форма і розміри вважаються постійними;

– інерційні сили при визначенні часу спорожнення водосховища не враховуються, тобто вважається, що рівень води у водосховищі, в разі його спорожнення весь час залишається горизонтальним;

– русло річки та долина річки, які затоплюються при проходженні хвилі прориву, схематизуються;

– річка за довжиною вважається такою, що складається з ділянок з однорідною шириною, глибинами, ухилами і шорсткостями (розрахункових ділянок);

– шорсткість русла та заплави приймаються середніми для всього перерізу розрахункової ділянки (незалежно від глибини та наповнення долини річки);

– розрахунок основних параметрів хвилі прориву проводиться за динамічною віссю потоку.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти шорсткості природних водотоків

№ п/п	Характеристика русла і заплави	$h$
1.	Природні русла у сприятливих умовах.	0,025
2.	Порівняно чисті русла постійних рівнинних потоків у звичайних умовах. Земляні русла періодичних потоків у сприятливих умовах.	0,040
3.	Русла великих і середніх річок, у значній мірі засмічені. Періодичні потоки з великою кількістю наносів. Заплави великих і середніх річок порівняно розроблені, покриті нормальною кількістю трави і чагарнику.	0,050
4.	Русла періодичних водотоків, сильно засмічені і звивисті. Погано розроблені зарослі заплави річок, русла гірського типу.	0,067
5.	Неправильні поперечні перерізи русла, нерівна поверхня русла, широкі заплави.	0,100
6.	Широкі заплави з дуже великими мертвими просторами, з місцевими заглибинами – озерами та ін.	0,150
7.	Потоки типу селєвих (бруд–камінь), глухі заплави, що заросли лісом.	0,2

Примітка: 1) зі збільшенням глибини води в річці, при заплавах середньої ширини, коефіцієнт шорсткості « $h$ », як правило, зменшується; 2) у зимових умовах, за наявності льоду, коефіцієнт шорсткості « $h$ » буває дещо більше, ніж в літніх.

### **Порядок розрахунку параметрів хвилі прориву**

1. Визначення висоти хвилі прориву в першому створі зруйнованої дамби:

$$H_B = 0,6(H_{\text{водосховище}} - h_{\text{річка}}), \text{ м.} \quad (3.62)$$

2. Визначення часу проходження хвилі прориву через перший створ зруйнованої дамби (час повного спорожнення водосховища):

$$T_1 = \frac{W_{\text{водосховища}} A}{3600 \mu V_{\text{прорив}} H_{\text{водосховища}} \sqrt{H_{\text{водосховища}}}}, \text{ год.}, \quad (3.63)$$

де  $A$  – коефіцієнт кривизни водосховища. Його величина знаходиться в межах від 1 до 8, використовуючи графік. Для приблизних розрахунків у середніх умовах його можна прийняти рівним 2;  $\mu$  – коефіцієнт витрати, що враховує форму русла і долини. Орієнтовно для трикутної форми русла він приймається рівним 0,4; для параболічної – 0,6; для прямокутної – 0,9.

3. Визначення часу добігання хвилі прориву до другого створу:

$$t_1 = \frac{L_1}{V_1}, \text{ год.}, \quad (3.64)$$

де  $L_1$  – довжина першої ділянки річки;  $V_1$  – швидкість руху хвилі прориву на першій ділянці, яка визначається відповідно до табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Середня швидкість руху хвилі прориву, км/год

Характеристика русла і заплави	$i = 1 \cdot 10^{-2}$	$i = 1 \cdot 10^{-3}$	$i = 1 \cdot 10^{-4}$
На річках з широкими затопленими заплавами	4–8	1–3	0,5–1
На звивистих річках із зарослими або нерівними кам'янистими заплавами, з розширеннями і звуженнями заплав	8–14	3–8	1–2
На річках з добре розробленим руслом, з вузькими і середніми заплавами без великих опорів	14–20	8–12	2–5
На малозвивистих річках із крутими берегами і вузькими заплавами	24–18	12–16	5–10

4. Визначення часу добігання хвилі прориву до третього створу:

$$t_2 = \frac{L_2}{V_2} + t_1, \text{ год.},$$

де  $L_2$  – довжина другої ділянки, км (тобто від другого до третього створу);  $V_2$  – швидкість руху хвилі прориву на другій ділянці, км/год.

Для отримання параметрів хвилі прориву в подальших створах здійснюють розрахунки аналогічним чином, з урахуванням примітки до табл. 3.4.

За отриманими даними про хвилю прориву у всіх створах будується графік руху хвилі прориву.

Таблиця 3.4 – Значення співвідношень висоти хвилі прориву і тривалість її проходження через створ

$t_1/T_1$	$H_{B_2}/H_{B_1}$	$T_2/T_1$
0,00	1,00	1,00
0,10	0,90	1,10
0,25	0,80	1,30
0,40	0,70	1,50
0,55	0,60	1,60
0,70	0,50	1,70
0,95	0,40	1,90
1,25	0,30	2,20
1,50	0,30	2,60

Примітка: 1) За великих значень  $t_1/T_1$  орієнтовно можна приймати  $H_{B_2}/H_{B_1} = 0,30$ , а  $T_2/T_1 = 2,60 - 3,00$ . 2) Дані таблиці є справедливими тільки для другого створу; при визначенні параметрів хвилі у третьому створі  $t_1/T_1$  замінюється відношенням  $t_2/T_2 + t_1$ , а у четвертому  $t_3/T_3 + t_1 + t_2$  і так далі.

### 3.3 Прогнозування процесу руху і трансформації селевого потоку

#### 1. Проривний сіль

Розрахункова схема представлена на рис. 3.3.

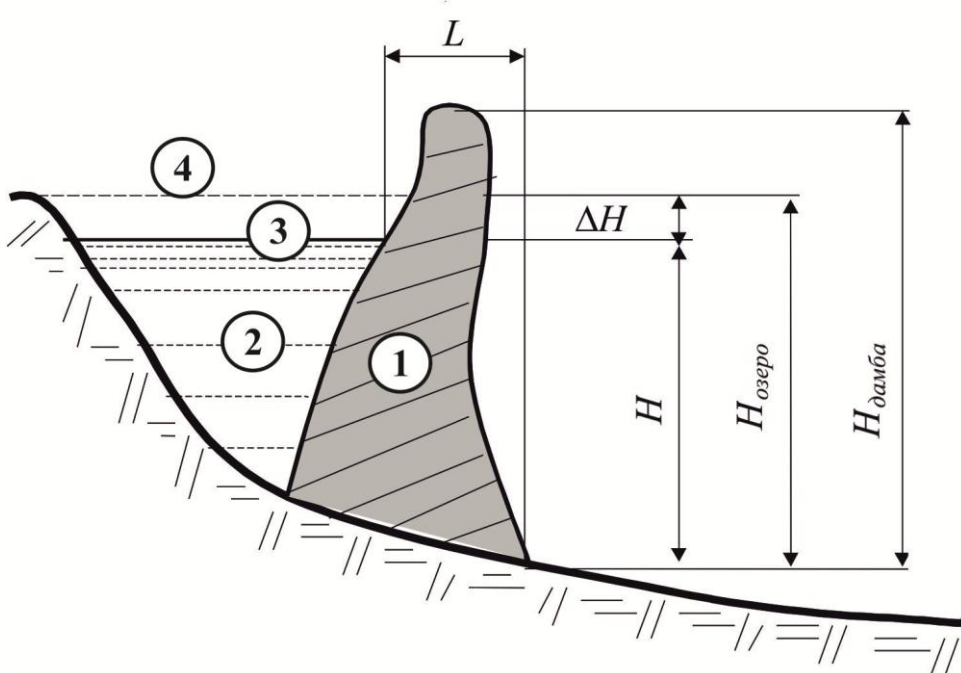


Рисунок 3.3 – Розрахункова схема проривного селю:

1 – льодовик; 2 – озеро; 3 – рівень води на початок прогнозу; 4 – розрахунковий проривний рівень;  $L$  – найкоротша відстань по горизонталі між основними перемичками і межею поверхні води в озері;  $H_{дамба}$  – висота дамби (льодовика);  $H_{озеро}$  – глибина озера у момент прориву;  $H$  – глибина озера на момент прогнозування;  $\Delta H = H_{озеро} - H$

До основних характеристик процесу руху і трансформації селевого потоку відносяться: максимальна витрата  $Q_C$ , об'єм виносів  $W_C$ , швидкість селевого потоку  $V_C$  і дальність просування селевого потоку  $L_C$ .

Для визначення максимальної витрати селевого потоку можна скористатися наступною залежністю:

$$Q_C = (1 + 0,10l \sin^2 \alpha) Q_{II}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.65)$$

де  $l$  – довжина селевого джерела, м;  $\alpha$  – ухил селевого джерела, град;  $Q_{II}$  – максимальна витрата селеутворювального паводку,  $\text{м}^3/\text{с}$ , яка визначається:

$$Q_{II} = k \frac{tSH_{\text{дамба}}^{3/2}}{L}, \quad (3.66)$$

де  $S$  – площа водної поверхні озера на рівні 80 % висоти дамби,  $\text{м}^2$ ;  $t$  – температура води в озері,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $k$  – коефіцієнт, який дорівнює  $6,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{1/2}/(\text{с} \cdot ^{\circ}\text{C})$ .

Об'єм селевого потоку розраховується за формулою:

$$W_C = (1 + 0,12l \sin^2 \alpha) W_{II}, \text{ м}^3, \quad (3.67)$$

де  $W_{II}$  – об'єм водного паводку, який визначається:

для озера, що підгачує льодовиком, –  $W_{II} = 20 \cdot 10^{-2} SH_{\text{дамба}}, \quad (3.68)$

для завального озера –  $W_{II} = 25 \cdot 10^{-2} S_m H_{\text{дамба}}, \quad (3.69)$

для моренного западинного озера –  $W_{II} = 5,5 \cdot 10^{-2} S_m^{3/2}, \quad (3.70)$

для моренного термокарстового озера –  $W_{II} = 10 \cdot 10^{-2} S_m^{3/2}, \quad (3.71)$

де  $S_m$  – площа водної поверхні озера за умов максимального заповнення,  $\text{м}^2$ .

Швидкість просування селевого потоку можна визначити за формулою:

$$V_C = 11,4 \sqrt{h^3 U_0 \sin \alpha}, \text{ м/с}, \quad (3.72)$$

де  $U_0$  – відносна гідравлічна величина кам'яних матеріалів, що залучаються до потоку ( $U_0 = 0,7 - 1,0$ );  $\alpha$  – середній кут нахилу селевого русла, град;  $h$  – середня глибина потоку, м.

Для оперативної оцінки величини  $h$  зазвичай приймають: для малопотужного потоку – 1,0–1,5 м, середньої потужності – 2,0–3,0 м; потужного потоку – 3,0–5,0 м.

Дальність просування селів визначається у два етапи.

На першому етапі розраховується дальність просування селевого потоку в долині річки:

$$L_1 = 12,1 \frac{W_C i}{dB}, \text{ м}, \quad (3.73)$$

де  $i$  – середній ухил долини;  $d$  – середній діаметр анкируючих уламків, що приймається: для селевих врезів – 0,5–0,8 м, для вибоїн – 0,3–0,4 м, і для осередку розосередженого селеутворення – 0,1–0,2 м;  $B$  – середня відстань між селевими береговими валами.

На другому етапі розраховується дальність просування селевого потоку на конусі винесення, за умови, що  $L_1 > L_D$ :

$$L_2 = \sqrt{36,6 \frac{(W_C - dB L_D) i_K}{d}}, \text{ м}, \quad (3.74)$$

де  $i_K$  – середній ухил конуса винесення;  $L_D$  – відстань від кінця селевого потоку (осередку) до вершини конуса винесення, м.

За умови:

$$\text{якщо } L_1 > L_D, \text{ то } L_C = L_1; \quad (3.75)$$

$$\text{якщо } L_1 < L_D, \text{ то } L_C = L_D + L_2,$$

де  $L_C$  – дальність просування селю, м.

## 2. Сель від дощового паводку

Величина максимальної витрати дощового паводку залежно від висоти шару заданої забезпеченості розраховується за формулою:

$$Q_D = \lambda k_C F H_1, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.76)$$

де  $k_C$  – коефіцієнт дощового стоку;  $\lambda$  – перехідний коефіцієнт від шарів дощового стоку 1%-ї забезпеченості до шарів стоку іншої ймовірності;  $F$  – площа водозбору, км<sup>2</sup>;  $H_1$  – максимальний добовий шар опадів 1%-ї забезпеченості, що визначається за даними найближчої метеостанції.

Максимальна витрата селевого потоку від дощового паводку визначається наступним чином:

$$Q_C^D = (1 + 0,10l \sin^2 \alpha) Q_D, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.77)$$

Об'єм водного паводку в разі випадіння опадів шаром заданої забезпеченості визначається:

$$W_D = 9,5 \cdot 10^2 \lambda F H_1, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.78)$$

Решта показників визначається за вищенаведеними залежностями.

Розрахунковий тиск селевого потоку на плоску перешкоду, залежно від швидкості та глибини, визначається додаванням гідростатичного та динамічного тиску.

Гідростатичний (статичний) тиск селю на споруду не залежить від його форми і орієнтації та визначається тільки щільністю і глибиною селевого потоку.

Гідростатичний (статичний) тиск за глибиною потоку розподіляється лінійно, збільшуючись із глибиною. Тому при розрахунках доцільно користуватися середнім статистичним тиском на половинній глибині селю:

$$\bar{P}_C = 0,5 g \rho h, \quad (3.79)$$

де  $\bar{P}_C$  – середній статистичний тиск селевого потоку на споруду;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $9,8 \text{ м/с}^2$ ;  $\rho$  – щільність потоку,  $\text{кг/м}^3$ ;  $h$  – глибина селевого потоку, м.

Динамічний тиск селю на споруду залежить від щільності, швидкості й кута зіткнення селю з перешкодою.

Під час руху селю швидкості частинок (масова швидкість) біля дна менше, ніж у середній і верхній частинах потоку. Проте відмінність є невеликою і нею можна знехтувати. Отже, можна вважати, що потік рухається з рівномірною по глибині швидкістю:

$$\hat{P}_C = 0,5 \rho C V_C, \quad (3.80)$$

де  $\hat{P}_C$  – динамічний тиск селю на перешкоду (тиск швидкісного натиску селю);  $C$  – коефіцієнт взаємодії потоку селю з перешкодою ( $C = \sin \alpha$ ; для випадку дії селевого потоку по нормалі до перешкоди ( $\alpha = 90^\circ$ ), то тиск буде максимальним,  $C = 1$ );  $\alpha$  – кут величини зіткнення потоку з перешкодою;  $V_C$  – швидкість просування селевого потоку, м/с, яка може бути визначена за емпіричною залежністю:

$$V_C = 11,4 \kappa \sqrt{h}, \quad (3.81)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт, який враховує відносну гідравлічну величину кам'яних матеріалів, які залучаються до потоку, та середній кут нахилу селевого русла.

Якщо провести аналіз отриманого динамічного тиску за залежністю (3.80), то можна зробити висновок, що кут зіткнення має значний вплив на

величину цього тиску. Так, наприклад, за швидкості потоку 5 м/с, щільності 1500 кг/см<sup>3</sup>, при  $\alpha = 90^\circ$ ,  $45^\circ$  і  $30^\circ$  динамічний тиск складає, відповідно, 0,0938; 0,0469 та 0,0187 МПа, тобто при  $45^\circ$  тиск впав удвічі, а при  $30^\circ$  – більш ніж в чотири рази. Проте для сумарного тиску потоку на перешкоду кут зіткнення робить значно менший вплив, оскільки для глибини потоку більш за один метр внесок статичного тиску перевищує динамічну складову.

З вищесказаного виходить, що сумарна сила, яка діє на об'єкт, може бути визначена:

$$N = F(\bar{P}_C + \hat{P}_C), \quad \text{або} \quad N = 0,5\rho F(gh + CV_C), \quad (3.82)$$

де  $F$  – площа проекції обтічної частини об'єкта на площину, перпендикулярну до напрямку руху селю, м<sup>2</sup>.

Для оцінки очікуваного характеру пошкоджень і руйнувань різних будівель і споруд необхідно визначити сумарне навантаження, що діє на об'єкт, і порівняти з даними табл. 3.5.

Прогнозування часу до початку прориву озера, що підгачує льодовиком, базується на оцінці досягнення рівня води 80–85 % висоти перемички ( $H_{\text{дамба}}$ ). Для цього необхідно визначити добовий підйом рівня води в озері ( $\Delta h$ ), різницю висотних відміток між рівнями 4 і 3 (див. розрахункову схему), площу водної поверхні ( $S$ ) до моменту прориву. За наявності цих даних час ( $\Delta t$ ) до початку прориву можна визначити за наступною залежністю:

$$\Delta t = 0,5 \left( 1 + \frac{S}{S_H} \right) \frac{\Delta H}{\Delta h}, \quad (3.83)$$

де  $S_H$  – площа дзеркала озера на початок прогнозу.

Методика можливого прориву моренних озер ґрунтується на даних метеостанцій про висоту нульової ізотерми, середньодобових температурах повітря поточного року і за багаторічний період, та передбачає визначення наступних величин:

1. Сума  $T_N$  середньодобових температур  $t_i$  за період з 1 травня поточного року на дату видачі прогнозу:

$$T_N = \sum_{i=1}^N t_i, \quad (3.84)$$

де  $N$  – порядковий номер дати видачі прогнозу.

Таблиця 3.5 – Ступені пошкодження об'єктів при дії селевих потоків

Об'єкти	Руйнування	Сильне пошкодження	Середнє пошкодження	Слабке пошкодження
1	2	3	4	5
Будівлі зі сталевими і залізобетонними каркасами	0,90...1,50*	0,75...0,90	0,75...0,81	0,45...0,81
Будівлі з легким металевим каркасом або безкаркасною конструкцією	0,75...1,05	0,45...0,75	0,30...0,45	0,15...0,30
Будівлі зі збірного залізобетону	0,60...1,90	0,45...0,60	0,30...0,45	0,15...0,30
Цегляні будівлі, безкаркасні, з покриттям із залізобетонних елементів, малоповерхові	0,68...0,98	0,53...0,68	0,30...0,53	0,20...0,30
Те ж, багатоповерхові (три поверхи і більше)	0,53...0,68	0,38...0,53	0,23...0,38	0,15...0,23
Склади-навіси із залізобетонних елементів	1,50...1,60	1,20...1,50	0,53...1,20	0,30...0,53
Адміністративні багатоповерхові будівлі з металевим і залізобетонним каркасом	0,75...0,90	0,60...0,75	0,45...0,60	0,30...0,45
Дерев'яні будівлі	0,30...0,45	0,18...0,30	0,12...0,18	0,09...0,12
Будівлі фідерної і трансформаторної підстанції з цеглини або блоків	0,90...1,20	0,60...0,90	0,30...0,60	0,15...0,30
Будівлі ГЕС (монолітний залізобетон)	4,50...5,00	3,00...4,50	1,50...3,00	0,75...1,50
Наземні сталеві газгольдери, резервуари для зберігання нафто- і хімпродуктів	0,60...0,68	0,45...0,6	0,30...0,45	0,23...0,30
Те ж, частково заглиблені	1,50...1,60	1,20...1,50	0,75...1,20	0,45...0,75
Сталеві й залізобетонні підземні резервуари для нафто- і хімпродуктів	3,00...3,20	1,50...3,00	1,05...1,50	0,60...1,05
Водонапірні башти	0,90...0,98	0,60...0,90	0,30...0,60	0,15...0,30
Повітряні лінії низької напруги	2,50...2,60	1,50...2,50	0,90...1,50	0,60...0,90
Те ж, високої напруги	1,05...1,13	0,75...1,05	0,45...0,75	0,38...0,45
Підземні сталеві трубопроводи діаметром до 35 см	30,00...34,00	23,00...30,00	15,00...23,00	9,00...15,00
Те ж, понад 35 см	15,00...18,00	9,00...15,00	5,50...9,00	3,00...5,50
Підземні чавунні і керамічні трубопроводи	30,00...33,00	15,00...30,00	9,00...15,00	3,00...9,00
Трубопроводи на металевих і залізобетонних естакадах	0,75...0,90	0,60...0,75	0,50...0,60	0,30...0,50



Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5
Заглиблені мережі комунального господарства (водопровід, газопровід, каналізація)	23,00...25,00	15,00...23,00	6,00...15,00	2,50...6,00
Радіорелейні лінії телефонно-телеграфного зв'язку	1,80...1,90	1,05...1,80	0,75...1,05	0,45...0,75
Повітряні лінії телефонно-телеграфного зв'язку	1,50...1,70	0,90...1,50	0,60...0,90	0,30...0,60
Кабельні підземні лінії зв'язку	1,60...1,80	1,00...1,60	0,65...1,00	0,40...0,65
Мости з металу і залізобетону прольотом до 50 м	3,80...4,50	3,00...3,80	2,30...3,00	1,50...2,30
Дерев'яні мости	2,50...3,00	1,60...2,50	0,90...1,60	0,60...0,90
Земляні дамби	15,00...20,00	12,00...15,00	10,00...12,00	3,00...10,00
Бетонні дамби	150	75,00...140,00	30,00...75,00	15,00...30,00

\* Вказаний сумарний тиск селевого потоку (105 Па)

Дата 1 травня відповідає  $N = 1$ .

2. Сума  $\bar{T}_N$  середньодобових температур  $T_{N_j}$  за період з 1 травня на дату видачі прогнозу за багаторічними даними:

$$\bar{T}_N = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M T_{N_j}, \quad (3.85)$$

де  $M$  – кількість років спостережень.

3. Сума  $T_N^*$  середньодобових температур за 10 попередніх до прогнозу днів:

$$T_N^* = \sum_{i=N-10}^N t_i. \quad (3.86)$$

4. Сума  $\bar{T}_N^*$  середньодобових температур  $T_{N_j}^*$  за багаторічний період:

$$\bar{T}_N^* = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M T_{N_j}^*. \quad (3.87)$$

5. Висота нульової ізотерми  $H_N$  в день видачі прогнозу.

6. Сума висот нульової ізотерми  $\bar{H}_N$ , відповідна дню видачі прогнозу, за багаторічними спостереженнями

$$\bar{H}_N = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_{N_j}. \quad (3.88)$$

Прогноз “Прорив озера можливий” видається, якщо виконуються одночасно три нерівності:

$$1,08T_N < T_N^*;$$

$$1,1T_N^* < T_N^*;$$

$$1,15H_N < H_N.$$

### 3.4 Обстановка в районах руйнівних землетрусів

#### *Інтенсивність сейсмічної дії при землетрусах*

Землетруси належать до найбільш небезпечних стихійних лих. Раптовість у поєднанні з величезною руйнівною силою коливань земної поверхні часто призводять до великої кількості людських жертв та значних матеріальних збитків. При цьому необхідно відзначити, що важливий внесок у кількість врятованих людей несуть гранично стислі терміни виконання рятувальних робіт, оскільки через добу після землетрусу 40 % кількості постраждалих, що отримали важкі травматичні ушкодження, відносять до загиблих, через 3 доби – 60 %, а через 6 діб – 95 %. Дана статистика свідчить про необхідність проведення рятувальних робіт для найшвидшого визволення людей із завалів. Навіть у випадку масових руйнувань рятувальні роботи необхідно завершити протягом 5 діб.

Виходячи з вищесказаного, для ефективної організації аварійно-рятувальних робіт необхідно відразу після дії землетрусу оцінити об'єм можливих руйнувань, визначити склад сил і засобів, необхідних для проведення рятувальних робіт у нормативно відведені терміни, приступити до їх введення в райони виконання завдань. Потім, за надходженням даних розвідки, уточнити потрібну кількість сил і засобів.

Зупинимося на деяких основних поняттях, необхідних для вирішення завдання оцінки обстановки в районах дії руйнівних землетрусів.

Землетрус виявляється у формі коливання ґрунту, причому активність його впливу на зовнішнє середовище, зокрема на будівлі, кількісно оцінюється *інтенсивністю* ( $J$ ) за дванадцятибальною шкалою. В Україні та низці європейських країн використовується Міжнародна модифікована сейсмічна шкала MMSK-86. Інтенсивність землетрусу не вимірюється приладами. Для її визначення необхідно досліджувати постраждалий район – виявити ступінь пошкодження будівель, шляхів, гірських схилів, зміни земної поверхні – всього того, що могло зазнати на собі дію землетрусу, включаючи реакцію людей і тварин. Існують спеціальні бланки, які розсилаються в райони землетрусів для збору даних. Картки із занесеними даними про землетрус обробляються, і на основі цього, використовуючи шкалу MMSK-86, оцінюється значення інтенсивності підземних поштовхів у різних пунктах району лиха.

Таким чином, інтенсивність землетрусів є величиною відносною і залежить від епіцентральної відстані (чим ближче до епіцентру, тим вище інтенсивність), глибини епіцентру (менше глибина – більша інтенсивність), а також від інших умов (високе залягання ґрунтових вод і рихлих порід сприяє посиленню бальності).

Існує об'єктивна міра величини землетрусу – *магнітуда*. Чим сильніше амплітуда сейсмічної хвилі, тим більше магнітуда землетрусу. Ідею магнітуди запропонував професор Каліфорнійського технологічного інституту Ріхтер. Шкала магнітуд Ріхтера основана на інструментальних даних, тобто на запи-

сах землетрусів сейсмографами, здатними уловити дуже слабкі струси ґрунту з амплітудами всього декілька мікрон.

Згідно досліджень Ріхтера, магнітуда поштовху являє собою логарифм вираженої в мікронах максимальної амплітуди запису цього поштовху, зробленого стандартним короткоперіодним крутильним сейсмометром на відстані 100 км від епіцентру. Оскільки сейсмометри можуть розміщуватися на різній відстані від епіцентру землетрусу, то для кожної сейсмостанції є відповідні методики розрахунку. Найпотужніший землетрус із зареєстрованих мав магнітуду 8,9.

Між магнітудою  $M$  та інтенсивністю землетрусів  $J$  в балах існує аналітична залежність, яка в літературі відома як формула макросейсмічного поля землі:

$$J = BM - C \lg \sqrt{D^2 + H^2} + E, \quad (3.89)$$

де  $D$  – епіцентральна відстань, км;  $H$  – глибина епіцентру, км;  $M$  – магнітуда землетрусів;  $B$ ,  $C$ ,  $E$  – регіональні константи.

Значення коефіцієнтів  $B$ ,  $C$ ,  $E$  у виразі (3.89) можуть бути різними для конкретних регіонів. Якщо значення констант невідомі, вони можуть бути прийняті рівними  $B = 1,5$ ,  $C = 3,5$ ,  $E = 3,0$ . Цією формулою користуються при прогнозуванні наслідків землетрусу.

Для завчасного прогнозування використовується, як правило, карта загального сейсмічного районування території України. Індeksi 1, 2, і 3 біля номіналів у зонах бальності відображають повторюваність сейсмічних землетрусів можливої інтенсивності один раз в 100, 1000 і 10000 років (71, 72, 73, 81, 82, 83, 91, 92, 93).

#### *Класифікація будівель і характеристика їх руйнування*

Під час проведення розрахунків для визначення наслідків землетрусу доцільно користуватися класифікацією будівель, наведеною в сейсмічній шкалі ММСК-86.

Відповідно до цієї шкали будівлі розподіляються на дві групи:

- будівлі й типові споруди без антисейсмічних заходів;
- будівлі й типові споруди з антисейсмічними заходами.

*Будівлі й типові споруди без антисейсмічних заходів* розділяють на такі типи:

*А 1 – місцеві будівлі.* Будівлі зі стінами з місцевих будівельних матеріалів: глиняні без каркаса; саманові або із сирцевої цеглини без фундаменту; виконані з окатаного або рваного каменю на глиняному розчині й без регулярної (з цеглини або каменю правильної форми) кладки в кутах і тому подібне.

*А 2 – місцеві будівлі.* Будівлі з саману або сирцевої цеглини, з кам'яними, цегляними або бетонними фундаментами; виконані з рваного ка-

мену на вапняному, цементному або складному розчині з регулярною кладкою в кутах; виконані з каменю пласта на вапняному, цементному або складному розчині; виконані з кладки типу «мідис»; будівлі з дерев'яним каркасом із заповненням саману або глини, з важкими земляними або глиняними дахами; суцільні масивні огорожі з саману або сирцевої цеглини і тому подібне.

*Б – місцеві будівлі.* Будівлі з дерев'яними каркасами із заповнювачами з саману або глини і легкими перекриттями.

*Б 1 – типові будівлі.* Будівлі з паленої цеглини, тесаного каменю або бетонних блоків на вапняному, цементному або складному розчині; дерев'яні щитові будинки.

*Б 2 – споруди* з паленої цеглини, тесаного каменю або бетонних блоків на вапняному, цементному або складному розчині: суцільні огорожі та стінки, трансформаторні кіоски, силосні й водонапірні башти.

*В – місцеві будівлі.* Дерев'яні будинки, що рубаються в «лапу» або в «обло».

*В 1 – типові будівлі.* Залізобетонні, каркасні великопанельні та армовані великоблокові будинки.

*В 2 – споруди.* Залізобетонні споруди: силосні й водонапірні башти, маяки, підпірні стінки, басейни тощо.

*Будівлі та типові споруди з антисейсмічними заходами* розділяються на такі типи:

*С 7 – типові будівлі та споруди* всіх видів (цегляні, блокові, панельні, бетонні, дерев'яні, щитові та ін.) з антисейсмічними заходами для розрахункової сейсмічності 7 балів.

*С 8 – типові будівлі та споруди* всіх видів з антисейсмічними заходами для розрахункової сейсмічності 8 балів.

*С 9 – типові будівлі та споруди* всіх видів з антисейсмічними заходами для розрахункової сейсмічності 9 балів.

У випадку поєднання в одній будівлі двох або трьох типів, будівлю в цілому слід відносити до найслабшого.

### *Характеристика руйнування будівель*

При проведенні розрахунків із прогнозування руйнувань і людських втрат при дії вибухових навантажень зазвичай розглядаються чотири ступені руйнування будівель – слабкий, середній, сильний і повний. При землетрусах прийнято розглядати п'ять ступенів руйнування будівель. У міжнародній модифікованій сейсмічній шкалі MMSK-86 пропонується наступна класифікація ступенів руйнування будівель:

*d = 1 – слабкі пошкодження.* Слабкі пошкодження матеріалу і неконструктивних елементів будівлі: тонкі тріщини у штукатурці; відколювання невеликих шматків штукатурки; тонкі тріщини у сполученнях перекриттів зі стінами і стінного заповнення з елементами каркасу, між панелями, в обробленні печей та дверних коробок; тонкі тріщини в перегородках, карнизах,

фронтах, трубах. Видимі пошкодження конструктивних елементів відсутні. Для ліквідації пошкоджень достатньо поточного ремонту будівель.

$d = 2$  – *помірні пошкодження*. Значні пошкодження матеріалу і неконструктивних елементів будівлі, падіння пластів штукатурки, крізні тріщини в перегородках, глибокі тріщини в карнизах і фронтонах, випадіння цегли з труб, падіння окремої черепиці. Слабкі пошкодження несучих конструкцій: тонкі тріщини в несучих стінах, незначні деформації й невеликі відколи бетону або розчину у вузлах каркаса і стиках панелей. Для ліквідації пошкоджень необхідний капітальний ремонт будівель.

$d = 3$  – *важкі пошкодження*. Руйнування неконструктивних елементів будівлі: обвали частин перегородок, карнизів, фронтонів, димарів. Значні пошкодження несучих конструкцій: крізні тріщини в несучих стінах, значні деформації каркаса, помітні зрушення панелей, викрошування бетону у вузлах каркаса. Можливий відновний ремонт будівлі.

$d = 4$  – *частковий руйнування несучих конструкцій*: проломи і вивали в несучих стінах; розвали стиків і вузлів каркаса; порушення зв'язків між частинами будівлі; обвалення окремих панелей перекриття; обвалення крупних частин будівлі. Будівля підлягає зносу.

$d = 5$  – *обвали*. Обвалення несучих стін і перекриттів, повне обвалення будівлі із втратою її форми.

Характер руйнування будівель у значній мірі залежить від конструктивних схем цих будівель.

У *каркасних будівлях* руйнуються переважно вузли каркаса, унаслідок виникнення в цих місцях значних вигинаючих моментів і поперечних сил. Особливо сильні пошкодження отримують основи стійок і вузли з'єднання ригелів зі стійками каркаса.

У *багатопанельних і великоблокових будівлях* найчастіше руйнуються стикові з'єднання панелей і блоків між собою та з перекриттями. При цьому спостерігається взаємний зсув панелей, розкриття вертикальних стиків, відхилення панелей від первинного положення, а в деяких випадках – обвалення панелей.

Для будівель із несучими стінами з місцевих матеріалів (сирцева цеглина, самані блоки, туфові блоки та ін.) характерні наступні пошкодження:

- поява тріщин у стінах;
- обвалення торцевих стін;
- зрушення, а іноді й обвалення перекриттів;
- обвалення окремо стоячих стійок, особливо печей і димарів.

*Найбільш стійкими до сейсмічної дії є дерев'яні рубані та каркасні будинки*. Як правило, такі будівлі зберігаються, і лише при інтенсивності 8 балів і більше спостерігається зміна геометрії будівлі, а в деяких випадках – обвалення дахів.

Руйнування будівель повною мірою характеризують закони руйнування. Під *законами руйнування* будівлі розуміється залежність між імовірністю її пошкодження та інтенсивністю прояву землетрусу в балах. Закони руйнування будівель отримані на основі аналізу статистичних матеріалів з руйну-

вання житлових, суспільних і промислових будівель від дії землетрусів різної інтенсивності.

Для побудови апроксимуючої кривої ймовірності настання не менше певного ступеня пошкодження будівель використовується нормальний закон. При цьому враховується, що для однієї й тієї ж будівлі може розглядатися не один, а п'ять ступенів руйнування, тобто після руйнування настає одна з п'яти несумісних подій. Значення математичного очікування  $M$  інтенсивності землетрусу в балах, що викликає не менш певних ступенів руйнування будівель, наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Математичні очікування  $M$  законів руйнування будівель

Класи будівель за ММСК-86	Ступені руйнування будівель				
	Легкий $d = 1$	Помірний $d = 2$	Важкий $d = 3$	Часткове руйнування $d = 4$	Обвал $d = 5$
	Математичні очікування $M$ законів руйнування				
A1, A2	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
B1, B2	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
B1, B2	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0
C7	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5
C8	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
C9	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5

Середні квадратичні відхилення інтенсивності землетрусу для законів руйнування приймаються рівними  $0,4$ .

#### *Прогнозування обстановки в районі руйнівних землетрусів*

Обстановку в районах руйнівних землетрусів прийнято оцінювати показниками, що характеризують інженерну обстановку, а також об'ємами аварійно-рятувальних робіт і заходів щодо життєзабезпечення населення.

Для оцінки інженерної обстановки великі населені пункти (міста) розбиваються на декілька майданчиків. Значення координат майданчиків приймаються рівними значенням координат їх центрів. Малі населені пункти розглядаються у вигляді одного елементарного майданчика (його координати визначаються як координати центру населеного пункту). Потім визначаються відстані від епіцентрів землетрусів до центру майданчиків і розраховується інтенсивність землетрусу для кожного майданчика за формулою (3.89).

При завчасному прогнозуванні можлива інтенсивність землетрусу приймається по картах загального сейсмічного районування території України.

*Основними показниками інженерної обстановки в районі руйнівних землетрусів є:*

– кількість будівель, що отримали обвали, часткові руйнування, важкі, помірні й легкі пошкодження, од.;

– площа зруйнованої частини міста, в межах якої забудова отримала важкі пошкодження, часткові руйнування і обвали (3, 4, і 5-го ступенів руйнування), км<sup>2</sup>;

- об'єм завалів, м<sup>3</sup>;
- кількість ділянок, що вимагають зміцнення (обвалення) пошкоджених або частково зруйнованих конструкцій, од.;
- протяжність завалених вулиць і проїздів, м.

Окрім основних показників, при оцінці інженерної обстановки можуть визначатися допоміжні показники, що характеризують завали.

Кількість будівель  $P_j$ , що отримали  $j$ -й ступінь руйнувань, визначають за формулою:

$$P_j = \sum_{i=1}^n K_i C_{ij}, \text{ од.} \quad (3.90)$$

де  $K_i$  – кількість будівель  $i$ -го типу в місті;  $C_{ij}$  – ймовірність отримання будівлею  $i$ -го типу  $j$ -го ступеня руйнування, що приймається за табл. 3.7;  $n$  – кількість типів будівель (максимальна кількість типів  $n = 6 - A, B, B, C 7, C 8, C 9$ ).

Таблиця 3.7 – Ймовірність  $C_i$  пошкодження різних типів будівель у залежності від інтенсивності землетрусу

Типи будівель	Ступінь руйнування	Ймовірність руйнування будівель при інтенсивності руйнування в балах						
		6	7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6	7	8	9
А	1	0,36	0,13	0	0	0	0	0
	2	0,12	0,37	0,02	0	0	0	0
	3	0,02	0,34	0,14	0	0	0	0
	4	0	0,13	0,34	0,02	0	0	0
	5	0	0,03	0,50	0,98	1	1	1
Б	1	0,09	0,4	0,01	0	0	0	0
	2	0,01	0,34	0,15	0	0	0	0
	3	0	0,13	0,34	0,02	0	0	0
	4	0	0,03	0,34	0,14	0	0	0
	5	0	0	0,16	0,84	1	1	1
В	1	0,01	0,36	0,13	0	0	0	0
	2	0	0,11	0,37	0,02	0	0	0
	3	0	0,03	0,34	0,14	0	0	0
	4	0	0	0,13	0,34	0,03	0	0
	5	0	0	0,03	0,50	0,97	1	1
С 7	1	0	0,09	0,4	0,01	0	0	0
	2	0	0,01	0,34	0,15	0	0	0
	3	0	0	0,13	0,34	0	0,02	0
	4	0	0	0,03	0,34	0,1	0,14	0
	5	0	0	0	0,16	0,09	0,84	1
С 8	1	0	0,01	0,36	0,13	0	0	0
	2	0	0	0,1	0,37	0,02	0	0
	3	0	0	0,02	0,34	0,14	0	0
	4	0	0	0	0,13	0,34	0,02	0
	5	0	0	0	0,03	0,50	0,98	1



Продовження таблиці 3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
С 9	1	0	0	0,09	0,4	0,01	0	0
	2	0	0	0,01	0,34	0,15	0	0
	3	0	0	0	0,13	0,34	0,02	0
	4	0	0	0	0,03	0,34	0,14	0
	5	0	0	0	0	0,16	0,84	1

Площа руйнувань частини міста, в межах якої забудова отримала важкі, часткові руйнування та обвали, визначається за формулою:

$$S_{\text{руйнування}}^{\text{Землетрус}} = \sum_{j=3,4,5} P_j / \Phi, \text{ км}^2, \quad (3.91)$$

де  $P_j$  – кількість будівель, що отримали 3, 4 і 5-й ступінь пошкодження;  $\Phi$  – щільність забудови в місті, буд./км<sup>2</sup>.

Загальний об'єм завалів визначається з умови, що в разі часткового руйнування будівель об'єм завалів складає приблизно 50 % від об'єму завалу у випадку повного руйнування:

$$W_{\text{завали}}^{\text{Землетруси}} = (0,5C_4 + C_5) \frac{\gamma dHS}{100}, \text{ м}^3, \quad (3.92)$$

де  $C_4, C_5$  – ймовірність отримання будівлею 4-го і 5-го ступенів руйнування;  $H$  – середня висота забудови, м;  $d$  – частка забудови на даній площі (щільність забудови);  $\gamma$  – коефіцієнт об'єму, що приймається для промислових будівель рівним 20, для житлових – 40.

Якщо місто є великим з нерівномірною щільністю і поверховістю забудови, то розрахунки слід проводити по ділянках (майданчиках), на які заздалегідь розбивається місто. Потім результати обчислень підсумовуються.

Досвід ліквідації наслідків руйнівних землетрусів показав, що під час проведення рятувальних робіт розбирається приблизно 15 % завалів від їх загального об'єму.

Структура завалу, вага і розмір уламків при руйнуванні будівель у зоні землетрусів може прийматися за даними розділу 4.

Кількість ділянок, що вимагають зміцнення (обвалення) пошкоджених або частково зруйнованих конструкцій, приймають рівною кількості будівель, що отримали часткові руйнування (4-й ступінь руйнування).

Протяжність завалених проїздів визначається виходячи з умови, що на 1 км<sup>2</sup> зруйнованої частини міста в середньому припадає 0,6 км завалених маршrutів (дані отримано на основі аналізу наслідків руйнівних землетрусів):

$$L_{\text{маршрут}}^{\text{Землетрус}} = 0,6 S_{\text{руйнування}}^{\text{Землетрус}}, \text{ км}, \quad (3.93)$$

де  $S_{\text{руйнування}}^{\text{Землетрус}}$  визначається за формулою (3.91).

Як показує досвід, винесення завалу за контури будівель у разі повного руйнування є невеликим і складає, наприклад, для дев'ятиповерхових будівель 7–9 метрів. Тому проїзди в зонах землетрусів опиняються практично не заваленими. На проїжджій частині можуть опинитися окремі уламки конструкцій будівель, що відлетіли. Це підтверджує і досвід землетрусу у Вірменії. Наприклад, у місті Ленінакан у старій частині міста, де ширина вулиць не перевищувала 10 метрів, під час руйнування 1–2-поверхових будівель на проїжджій частині утворилися невеликі завали з туфових блоків.

Проте все вищесказане є справедливим тільки для випадків руйнування будівель без перекидання. У районах зі зниженою несучою здатністю і великою деформованістю ґрунтів можливі випадки руйнувань висотних будівель з їх перекиданням. Висота і довжина завалу в цьому випадку залежатиме від розмірів будівлі.

Найбільш характерними пошкодженнями шляхів у зонах руйнувань при землетрусах є: руйнування ділянок шляхів унаслідок обвалів; утворення тріщин у дорожньому полотні у декілька десятків сантиметрів, а також руйнування дорожнього покриття (у дев'ятибальній зоні).

У гірській місцевості можливе утворення кам'яних і сніжних завалів, руйнування мостів, шляхопроводів, тунелів.

Слід зазначити, що при землетрусі 9 балів і більше можуть бути зруйновані аеродромні покриття.

Дальність розльоту уламків  $l$  і висота завалів  $h$  при землетрусі визначається відповідно до методик, наведених у розділі 4. Узагальнені залежності мають такий вигляд:

$$l = \frac{H}{C}, \text{ м}; \quad h = \frac{\gamma H}{100 + 0,5H}, \text{ м}, \quad (3.94)$$

де  $H$  – висота будівлі, м;  $\gamma$  – об'єм завалу на  $100 \text{ м}^3$  будівельного об'єму незруйнованої будівлі.

Кількість аварій на комунально-експлуатаційних мережах (КЕМ) визначається з умови, що на  $1 \text{ км}^2$  зруйнованої частині міста доводиться 6–8 аварій:

$$K_{\text{КЕМ}}^{\text{Землетрус}} = 8 S_{\text{руйнування}}^{\text{Землетрус}}, \quad (3.95)$$

де  $S_{\text{руйнування}}^{\text{Землетрус}}$  визначається за формулою (3.91).

Ці дані отримано на підставі аналізу наслідків руйнівних землетрусів.

Причини, що викликають пошкодження КЕМ, можна розділити на дві групи. До першої групи відносяться причини, пов'язані з хвиловим рухом ґрунту, унаслідок чого в елементах КЕМ з'являються зусилля, які викликають рух підземних комунікацій та споруд КЕМ – колекторів, трубопроводів, колодязів, кабельних ліній.

До другої групи відносяться причини, пов'язані з руйнуванням введів в наземні будівлі та споруди, а також пошкодження елементів КЕМ уламками будівель.

Наслідки від аварії КЕМ можуть справляти негативний вплив на людей: ураження електричним струмом при дотику до обірваних проводів; отруєння газом; виникнення пожеж унаслідок коротких замикань і спалаху газу.

Крім того, існує небезпека затоплення території унаслідок руйнування водопровідних труб і каналізаційних коректорів, опіку людей в разі руйнування елементів системи паро- і теплопостачання.

Аварії на КЕМ можуть призвести до припинення постачання води, електроенергії та тепла до будівель і споруд.

До показників, що впливають на об'єми аварійно-рятувальних робіт і вирішення завдань життєзабезпечення населення в зонах руйнівних землетрусів, відносять: кількість постраждалих людей, структуру втрат; кількість людей, що опинилися під завалами і опинилися без даху; потреба в тимчасовому житлі (наметах, будинках); пожежну обстановку; радіаційну і хімічну обстановку в зоні руйнувань.

Розрахунки проводяться за методиками оперативного прогнозування, наведеними в розділі 4.

Узагальнену залежність для визначення втрат у випадку виникнення руйнівних землетрусів можна представити у вигляді:

$$U^{Coц.} = R \sum_{i=1}^n N_i C_i, \text{ осіб}, \quad (3.96)$$

де  $R$  – імовірність розміщення людей в зоні ризику в будівлях (у середньому  $R = 0,83$ );  $N_i$  – кількість людей в будівлях  $i$ -ї групи, осіб;  $C_i$  – ймовірність ураження людей в будівлях  $i$ -ї групи, яка визначається за табл. 3.8.

Більш точні значення  $R$  для виразу (3.96) приймаються рівними:

з 23.00 до 7.00 години  $R = 1,00$ ;

з 7.00 до 9.00 години  $R = 0,60$ ;

з 9.00 до 18.00 години  $R = 0,70$ ;

з 18.00 до 20.00 години  $R = 0,65$ ;

з 20.00 до 23.00 години  $R = 0,90$ .

Таблиця 3.8 – Імовірність  $C_i$  загальних і незворотних втрат людей в різних типах будівель (за класифікацією ММСК-86) при землетрусах

Типи будівель	Ступінь ураження людей	Імовірність втрат людей в різних типах будівель при інтенсивності землетрусу в балах						
		6	7	8	9	10	11	12
А	Загальні	0,004	0,14	0,70	0,96	0,97	0,97	0,97
	Незворотні	0	0,05	0,38	0,59	0,6	0,6	0,6
Б	Загальні	0	0,03	0,39	0,90	0,97	0,97	0,97
	Незворотні	0	0,01	0,18	0,53	0,6	0,6	0,6
В	Загальні	0	0	0,14	0,70	0,96	0,97	0,97
	Незворотні	0	0	0,05	0,38	0,59	0,6	0,6
С 7	Загальні	0	0	0,03	0,39	0,90	0,97	0,97
	Незворотні	0	0	0,01	0,18	0,53	0,6	0,6
С 8	Загальні	0	0	0,004	0,14	0,70	0,96	0,97
	Незворотні	0	0	0	0,05	0,38	0,59	0,6
С 9	Загальні	0	0	0	0,03	0,39	0,90	0,97
	Незворотні	0	0	0	0,01	0,18	0,53	0,6

*Кількість людей, що опинилися без даху, приймається рівною кількості людей, що проживали в будівлях, які отримали важкі пошкодження, часткові руйнування та обвали.*

*Кількість людей, що опинилися в завалах, визначається так само, як і при аваріях на пожежонебезпечних об'єктах.*

Аналіз наслідків землетрусів показує, що в середньому в половині будівель, які отримали часткові руйнування та обвали, можливе виникнення пожеж.

Викладені рекомендації дозволяють визначити основні показники, що характеризують обстановку в районах руйнівних землетрусів.

Отримані показники дозволяють посадовим особам, відповідальним за організацію рятувальних робіт, визначити склад сил і засобів та розробити ефективні варіанти їх застосування для проведення аварійно-рятувальних робіт.

### **Контрольні питання та завдання**

1. Вкажіть основні характеристики хвилі прориву.
2. Розкрийте основні положення щодо визначення параметрів хвилі прориву.
3. Надайте порядок побудови графіка руху хвилі прориву.
4. Розкрийте основні положення щодо прогнозування наслідків паводкової повені.
5. Розкрийте основні положення щодо розрахунку сил аварійно-рятувальних робіт при повенях.
6. Розкрийте основні положення щодо розрахунку сил аварійно-відновлюваних робіт при повенях.
7. Розкрийте основні положення щодо прогнозування процесу руху селевого потоку.

8. Назвіть основні показники, що характеризують землетруси, та надайте методи визначення цих показників.

9. З якою метою проводиться класифікація будівель за сейсмостійкістю?

10. Надайте характеристику ступенів руйнування будівель при землетрусах.

11. Перерахуйте основні показники, що характеризують обстановку в районах руйнівних землетрусів.

12. У чому полягає сутність методичних підходів при визначенні показників інженерної обстановки в районах руйнівних землетрусів?

## ГЛАВА 4. ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ

### 4.1 Завали, що утворюються при руйнуванні будівель у зонах ураження

При дії вражаючих чинників вибухів, землетрусів, при руйнуванні дамб будівлі можуть отримати той або інший ступінь руйнування. Аналіз характеру руйнувань будівель при надзвичайних ситуаціях показав, що будівлі в разі повного руйнування практично повністю перетворюються на уламки, утворюючи завали. При руйнуванні будівель на ступінь нижче від повної в розрахунках можна прийняти, що об'єм завалів складає приблизно 50 % від об'ємів завалів будівель у разі їх повного руйнування.

Завали різних типів будівель характеризуються відповідними показниками. Показники завалів будівель є визначальними параметрами при виборі технології рятувальних робіт. Дані показники можна звести до двох груп:

- показники, що безпосередньо характеризують завал;
- показники, що характеризують уламки завалу.

*До показників, що безпосередньо характеризують завал, можна віднести:*

- дальність розльоту уламків;
- висоту завалу;
- об'ємно-масові характеристики завалів;
- структуру завалів за вагою уламків, складом будівельних елементів і арматури.

*До показників, що характеризують уламки завалу, відносять:*

- вагу уламків;
- геометричні розміри уламків;
- структуру і вміст арматури.

#### 4.1.1 Розрахункові схеми завалів

На підставі аналізу матеріалів натурних завалів будівель встановлено, що завали будівель можна спрощено представити як обеліски – геометричні фігури із прямокутними основами, розташованими в паралельних площинах (рис. 4.1). Протилежні бічні грані обеліска нахилені до основи. Основними даними для побудови цієї фігури є розміри основи будівлі  $A$  і  $B$ , висота завалу  $h$  і дальність розльоту уламків  $L$ . Характерними геометричними показниками завалу також є довжина і ширина завалу.

*Довжина завалу* – геометричний розмір завалу в напрямку найбільшого розміру  $A$  будівлі:

$$A_{зав} = 2L + A. \quad (4.1)$$

*Ширина завалу* – геометричний розмір завалу в напрямку найменшого розміру  $B$  будівлі:

$$B_{зав} = 2L + B. \quad (4.2)$$

Розрахункові схеми завалів залежать від дії вражаючого чинника. Приймається, що при аварії з вибухом усередині будівлі уламки розлітаються у сторони рівномірно, а при вибуху поза будівлею уламки зміщуються за напрямком дії повітряної ударної хвилі.

Характерний розмір завалу за напрямком дії повітряної ударної хвилі дорівнює:

$$B_{зав} = B + L \text{ або } A_{зав} = A + L. \quad (4.3)$$

Верхня грань розрахункового обеліска при аваріях із вибухом дорівнює площі основи будівлі. При землетрусах площа верхньої грані обеліска за розмірами менше площі основи будівлі. Довжина і ширина верхньої грані обеліска для цього випадку дорівнює:

$$A_l = A - 2L; B_l = B - 2L. \quad (4.4)$$

## 4.1.2 Дальність розльоту уламків

### 4.1.2.1 Дальність розльоту уламків при вибухах

Розглянемо методику визначення дальності розльоту уламків при вибухах, прийнявши наступні припущення:

- хвиля миттєво обтікає уламки внаслідок їх невеликих розмірів;
- обертання уламків у разі розльоту і зміни за рахунок цього лобової площі  $F_l$  не відбувається.

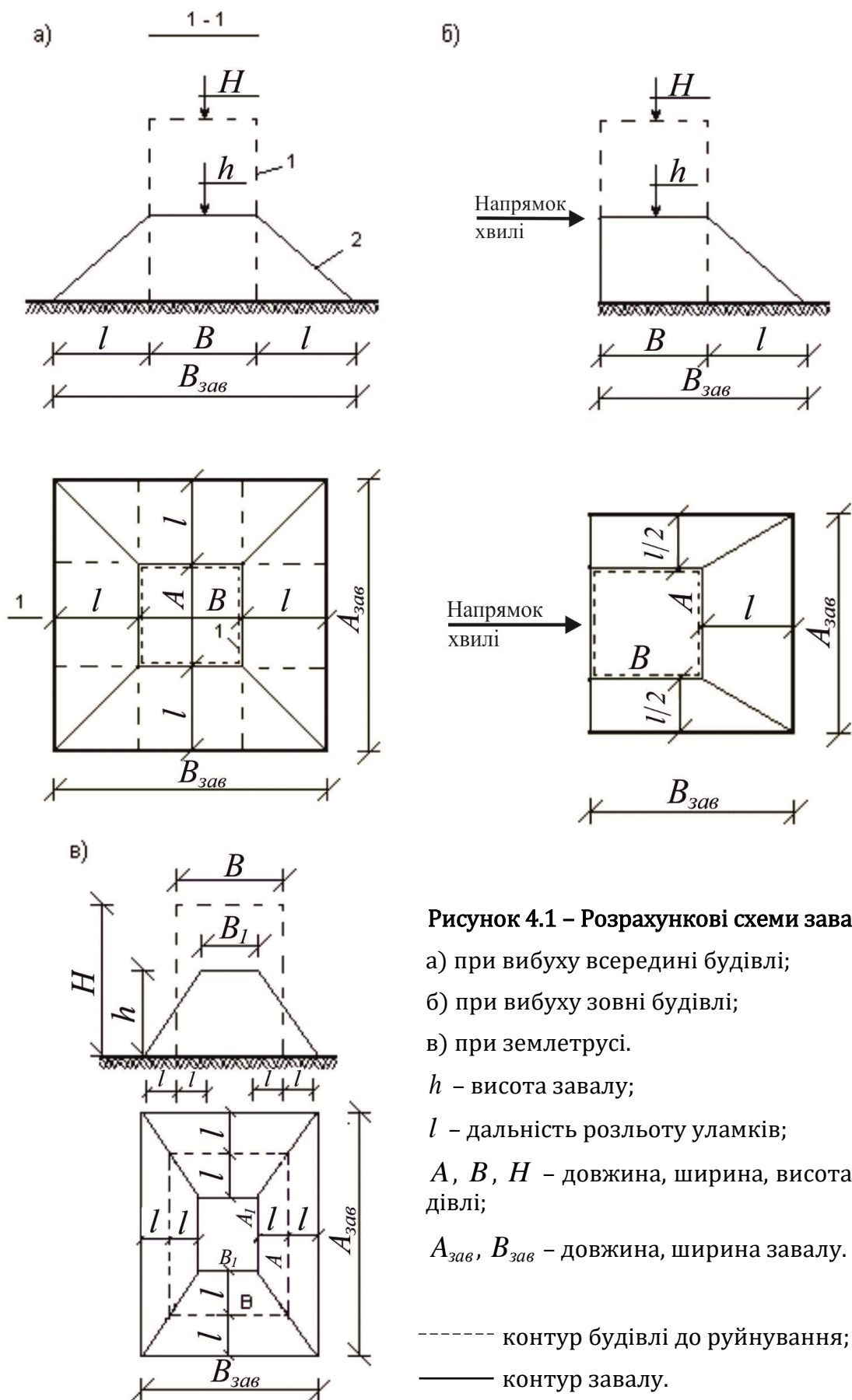
Дальність розльоту уламків  $L$  – це відстань від контуру будівлі до основної маси уламків.

Зсув уламків можна описати рівняннями руху в горизонтальному і вертикальному напрямках. Розглянемо спочатку горизонтальний рух уламків з урахуванням опору повітря.

Силу, що створюється швидкісним натиском повітряної ударної хвилі, яка діє на уламок, обчислюють за формулою:

$$F_{ув} (t) = C_x F_l \frac{\rho_{\phi}(t) U_{\phi}^2(t)}{2}, \quad (4.5)$$

де  $C_x$  – коефіцієнт лобового опору, який для уламків приймають рівним 1.5;  $\rho_{\phi}(t)$  і  $U_{\phi}(t)$  – щільність і швидкість повітряного потоку в момент часу  $t$ ;  $F_l$  – площа лобового перерізу уламків.





При збільшенні швидкості уламків зростає опір повітряного потоку горизонтальному руху уламку:

$$F_x(t) = C_x F_n \frac{\rho_\phi(t) \dot{x}^2(t)}{2}, \quad (4.6)$$

де  $\dot{x}(t)$  – горизонтальна швидкість уламка в момент часу  $t$ .

Тепер розглянемо вертикальний рух уламків з урахуванням опору повітря. Навантаження, що створюється силою тяжіння, складе:

$$P = F_n d \rho g, \quad (4.7)$$

де  $d$  – товщина стіни будівлі;  $\rho$  – щільність матеріалу;  $g$  – прискорення вільного падіння.

Опір повітряного потоку вертикальному руху можна описати залежністю:

$$F_y(t) = C_y F_n \frac{\rho_\phi(t) \dot{y}^2(t)}{2}, \quad (4.8)$$

де  $C_y$  – коефіцієнт опору ( $C_y = C_x$ );  $F_n$  – площа горизонтального перерізу уламка;  $\dot{y}(t)$  – вертикальна швидкість уламка в момент часу  $t$ .

Тоді рух уламка можна описати наступною системою рівнянь:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = C_x F_n \frac{\rho_\phi(t)}{2} [U_\phi^2(t) - \dot{x}^2(t)] \\ m\ddot{y} = F_n d \rho g - C_y F_n \frac{\rho_\phi(t) \dot{y}^2(t)}{2} \end{cases} \quad (4.9)$$

де  $m = F_n \cdot d \cdot \rho$  – маса уламка.

Розв'язання системи диференціальних рівнянь (4.9) і дані натурних завалів показують, що дальність розльоту уламків за мінімального тиску, який викликає повне руйнування стін будівель, приблизно складає  $L = \frac{H}{2} \div H$ , м ( $H$  – висота будівлі).

#### 4.1.2.2 Дальність розльоту уламків при землетрусах

При землетрусах дальність розльоту уламків розраховується за умови, що кут нахилу бічних сторін обеліска рівний куту природного укосу. Виходячи з цієї умови, дальність розльоту уламків для даного випадку складає:

$$L = \frac{H}{3} \div \frac{H}{4}, \text{ м (} H \text{ – висота будівлі).}$$

Підводячи підсумки, можна рекомендувати при оперативному прогнозуванні дальність розльоту уламків приймати рівною (м):

$$\text{при аваріях із вибухом} - L = H; \quad (4.10)$$

$$\text{при землетрусах} - L = \frac{H}{3}. \quad (4.11)$$

### 4.1.3 Висота завалів

#### 4.1.3.1 Висота завалів при вибухах

Висота завалу  $h$  – це відстань від рівня землі до максимального рівня уламків у межах контуру будівлі.

Основними чинниками, що визначають висоту завалу, є поверховість будівлі та величина тиску, що діє у фронті повітряної ударної хвилі. Чим більший тиск, тим далі розлітаються уламки, що призводить до зменшення висоти завалу (рис. 4.2). Максимальною за величиною висота завалу буде в тому випадку, якщо на будівлю буде діяти мінімальний тиск, який викликає руйнування стін будівлі. За мінімальний тиск зазвичай приймають  $\Delta P_{\phi} = 0,05$  МПа.

Висоту завалу можна визначити виходячи з умови рівності об'єму завалу, що утворився

$$V = \frac{\gamma ABH}{100}, \quad (4.12)$$

і об'єму обеліска

$$V = \frac{h}{6} [AB + (A + A_{зав})(B + B_{зав}) + A_{зав}B_{зав}], \quad (4.13)$$

де  $A$ ,  $B$ ,  $H$  – довжина, ширина і висота будівлі;  $\gamma$  – об'єм завалу на 100 м<sup>3</sup> об'єму будівлі;  $h$  – висота завалу;  $L$  – дальність розльоту уламків;  $A_{зав}$ ,  $B_{зав}$  – довжина і ширина завалу:

$$A_{зав} = 2L + A; B_{зав} = 2L + B \quad (\text{при вибуху всередині будівлі}); \quad (4.14)$$

$$A_{зав} = L + A; B_{зав} = L + B \quad (\text{при вибуху поза будівлею}).$$

При розрахунку висоти завалу за формулою (4.13) дальність розльоту уламків для аварій з вибухом рекомендується приймати рівною половині висоти будівлі ( $L = \frac{H}{2}$ ).

Висота завалу на різних відстанях  $x$  від будівлі залежить від висоти завалу в межах контуру будівлі й дальності  $l$  розльоту уламків:

$$h(x) = h \left( 1 - \frac{x}{l} \right).$$

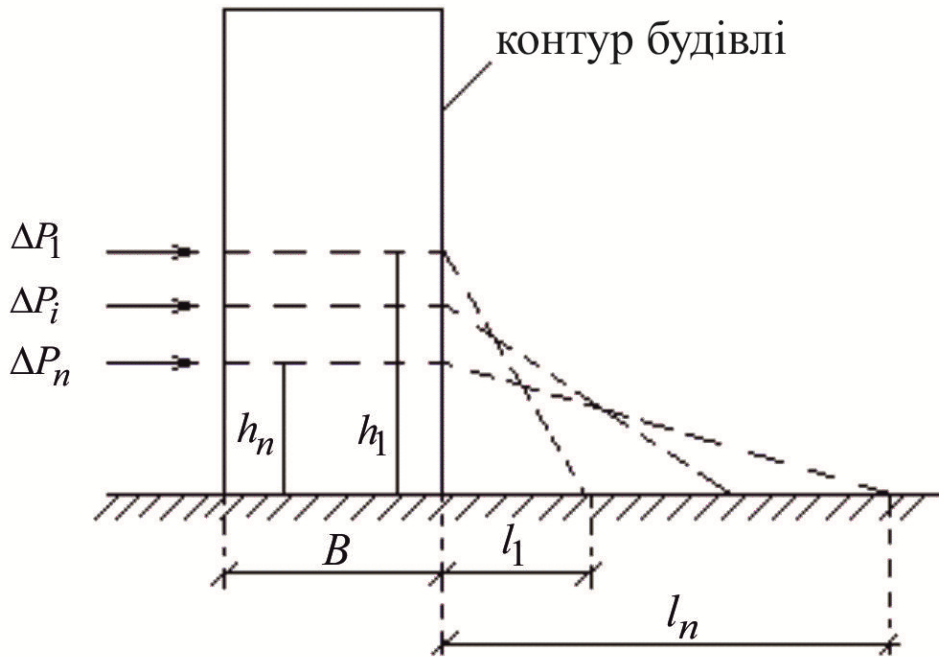


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема утворення завалу за різного тиску у фронті повітряної ударної хвилі:

$h_1, h_n, l_1, l_n$  – відповідно висота і довжина завалу;  $\Delta P_1, \Delta P_i, \Delta P_n$  – значення тиску ( $\Delta P_1 < \Delta P_i < \Delta P_n$ );  $B$  – розмір (ширина) будівлі

Показник  $\gamma$  у формулі (4.12) при орієнтовних розрахунках рекомендується приймати рівним:

- для промислових будівель  $\gamma = 20 \text{ м}^3$ ;
- для житлових будівель  $\gamma = 40 \text{ м}^3$ .

Більш точні значення показників, з урахуванням різних типів і конструктивних рішень будівель, приведені в таблиці 4.1. Ці дані отримано на основі статистичної обробки відповідних показників натурних завалів.

На підставі узагальнення розрахунків отримано формулу для визначення висоти завалу при оперативному прогнозуванні:

$$h = \frac{\gamma H}{100 + kH}, \text{ м}, \quad (4.15)$$

де  $H$  – висота будівлі в м;  $\gamma$  – об'єм завалу на  $100 \text{ м}^3$  об'єму будівлі;  $k$  – показник, що приймається рівним:

- для вибуху поза будівлею  $k = 2$ ;
- для вибуху в середині будівлі  $k = 2,5$ .

Таблиця 4.1 – Об’ємно-масові характеристики завалу

Тип будівлі	Порожнистість ( $\alpha$ ), м <sup>3</sup>	Питомий об’єм ( $\gamma$ ), м <sup>3</sup>	Об’ємна вага ( $\beta$ ), т/м <sup>3</sup>
Виробничі будівлі:			
одноповерхова легкого типу	40	14	1.5
одноповерхова середнього типу	50	16	1.2
одноповерхова важкого типу	60	20	1
багатоповерхова	40	21	1.5
змішаного типу	45	22	1.4
Житлові будинки безкаркасні:			
цегляні	30	36	1.2
дрібноблокові	30	36	1.2
великоблокові	30	36	1.2
великопанельні	40	42	1.1
Житлові будинки каркасні:			
зі стінами з навісних панелей	40	42	1.1
зі стінами з кам’яних матеріалів	40	42	1.1

- Примітки:
1. Порожнистість завалу ( $\alpha$ ) – об’єм порожнеч на 100 м<sup>3</sup> завалу.
  2. Питомий об’єм завалу ( $\gamma$ ) – об’єм завалу на 100 м<sup>3</sup> будівельного об’єму.
  3. Об’ємна вага завалу ( $\beta$ ) – вага в тоннах 1 м<sup>3</sup> завалу.

#### 4.1.3.2 Висота завалів при землетрусах

При землетрусах висота завалу розраховується за такими самими формулами, але з урахуванням поправки на розрахункову схему завалу (рис. 4.1). Об’єм обеліска в цьому випадку дорівнює:

$$V = \frac{h}{6} [A_1 B_1 + (A_1 + A_{зав})(B_1 + B_{зав}) + A_{зав} B_{зав}], \quad (4.16)$$

де  $A_{зав}$ ,  $B_{зав}$  – довжина і ширина завалу:

$$A_{зав} = 2L + A; \quad B_{зав} = 2L + B;$$

$A_1$  і  $B_1$  – розміри верхніх граней обеліска:

$$A_1 = A - 2L; \quad B_1 = B - 2L.$$

При оперативному прогнозуванні висоту завалу для землетрусу рекомендується визначати за формулою (4.15), в якій показник  $k$  приймається рівним  $k = 0,5$ .

## 4.1.4 Структура і об'ємно-масові характеристики завалів

### 4.1.4.1 Структура завалів

Структура завалів впливає як на способи виконання аварійно-рятувальних робіт, так і на склад сил та засобів, що залучаються для ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій. Основними показниками, що характеризують структуру завалу, є розподіл уламків за вагою, складом елементів (матеріалу) і вмістом арматури.

*Структура завалу за вагою уламків* – це відсотковий вміст у завалах різних типів уламків – визначається за таблицею 4.2. Дані показники отримано на основі аналізу інформації про завали будівель, зруйнованих при аваріях і катастрофах, а також під час проведення ряду натурних випробувань. При визначенні складу сил і засобів слід мати на увазі, що дуже крупні та крупні уламки (вага більш двох тонн) переміщуються з використанням інженерної техніки, середні (вага до двох тонн) можуть бути переміщені за допомогою ручних лебідок, а дрібні (вага до 0,2 т) можуть бути переміщені рятувальниками вручну.

Таблиця 4.2 – Структура завалу за вагою уламків, (%)

Тип будівлі	Тип уламків за вагою			
	Дуже великі більше 5 т	Великі від 2 до 5 т	Середні від 0,2 до 2т	Дрібні до 0,2 т
Виробнича одноповерхова	60	10	20/5	10/25
Виробнича багатоповерхова і змішаного типу	10	40	40/10	10/40
Житловий будинок безкаркасний	0	30	60/10	10/60
Житловий будинок каркасний	0	50	40/10	10/40

Примітка: у чисельнику – значення для стін із крупних панелей, у знаменнику – значення для стін із кам'яних матеріалів (цегли, дрібних уламків).

*Структура завалу за складом елементів* – відсотковий вміст у завалах уламків з різного матеріалу – визначається за таблицею 4.3. Ці показники можуть бути використані при оцінці обсягів і видів робіт.

*Структура завалу за складом арматури* – вміст арматури в різних перерізах завалу.

Показники вмісту арматури в різних перерізах завалу отримано на основі аналізу проєктів виробничих і житлових будівель. Результати узагальнення матеріалів приведені в таблиці 4.4. Вміст арматури в завалі за межами контуру будівлі визначається за формулою:

$$F_a(x) = F_a \left( 1 - \frac{x}{l} \right), \text{ см}^2,$$

де  $F_a$  – вміст арматури в межах контуру будівлі (таблиця 4.4);  $x$  – відстань від контуру будівлі;  $l$  – дальність розльоту уламків.

Таблиця 4.3 – Структура завалу за складом елементів (%) при руйнуванні будівель

Склад елементів	Будинки житлові зі стінами		Будівлі виробничі зі стінами	
	з цегли (кам'яних матеріалів)	з крупних панелей	з цегли	з крупних панелей
Цегляні глиби, бита цегла	50	–	25	–
Уламки залізобетонних і бетонних конструкцій	15	75	55	80
Дерев'яні конструкції	15	8	3	3
Металеві конструкції (включаючи верстатне устаткування)	5	2	10	10
Будівельне сміття	15	15	7	7

Показники вмісту арматури в завалі можуть бути використані під час планування розподілу технічних засобів, що застосовуються для різання металу.

Таблиця 4.4 – Структура завалу за вмістом арматури

Тип будівлі	Вміст арматури в межах контуру будівлі на 1 пог. м завалу, ( $F_a$ ), см <sup>2</sup>	Сортамент арматури на 1 пог. м завалу
Виробничі одноповерхові:		
легкого типу	20	Ø 12÷14 – 11 од. Ø 28÷32 – 1 од.
середнього типу	25	Ø 12÷14 – 12 од. Ø 32÷36 – 1 од.
важкого типу	30	Ø 12÷14 – 13 од. Ø 36÷40 – 1 од.
виробниче багатоповерхове	15n (n – число поверхів)	Ø 12÷14 – 16 од. Ø 36÷40 – 1 од.
виробниче змішаного типу	40	Ø 12÷14 – 16 од. Ø 36÷40 – 1 од.
Житлові будинки безкаркасні:		
дрібноблокові	12n	Ø 12÷14 – 7 од.
крупноблокові	12n	Ø 12÷14 – 7 од.
крупнопанельні	14n	Ø 12÷14 – 9 од.
житлові будинки каркасні	20n	Ø 12÷14 – 9 од. Ø 25÷28 – 11 од.

#### 4.1.4.2 Об'ємно-масові характеристики завалів

Об'ємно-масові характеристики завалів використовуються для обґрунтування складу транспортної й вантажопідйомної інженерної техніки. До цих характеристик віднесені: питомий об'єм завалу, об'єм завалу від зруйнованої будівлі, об'ємна вага завалу і порожнистість.

Питомий об'єм завалу ( $\gamma$ ) – об'єм завалу на  $100 \text{ м}^3$  – визначається за таблицею 4.1. Цей показник використовується при визначенні висоти завалу і об'єму завалу.

Об'єм завалу від обрушеної будівлі розраховується за формулою (4.12).

Об'ємна вага завалу ( $\beta$ ) – вага в тоннах  $1 \text{ м}^3$  завалу – визначається за таблицею 4.1. Останні два показники використовуються при плануванні транспортних засобів для розбирання завалів.

Показник порожнистості завалу ( $\alpha$ ) – використовується під час підготовки пропозицій щодо технології рятувальних робіт, зокрема при проходженні галерей в завалах. Аналіз інформації по руйнуванню будівель показав, що порожнистість завалів промислових будівель може бути майже у два рази більше житлових. Показники порожнистості завалів наведено в таблиці 4.1.

#### 4.1.5 Показники уламків

До показників, що характеризують крупні уламки завалів, віднесено максимальну вагу, розміри та структуру уламка за складом арматури. Максимальну вагу уламків необхідно знати для підбору вантажопідйомності крана, а їх розміри – для підбору транспортних засобів. Ці показники отримані на основі аналізу проєктів виробничих і житлових будівель та можуть бути прийняті для виробничих будівель за таблицею 4.5, для житлових – за таблицею 4.6.

Як видно з таблиць, для виконання рятувальних робіт при розбиранні завалів виробничих будівель може виникнути потреба у кранах вантажопідйомністю понад 30 тонн. Під час проведення робіт у районах розміщення житлових будинків достатньо мати вантажопідйомні засоби до чотирьох тонн.

Таблиця 4.5 – Вага основних конструктивних елементів виробничих будівель і вміст арматури

Тип будівлі	Конструктивні елементи та їх розміри, м		Вага, т	Вміст арматури, кг
1	2		3	4
Одноповерхова легкого типу		$H = 3.6$	1	80
		$H = 7.2$	4	300
	Балки покриття:	$l = 6$	3	200
		$l = 12$	5	300
		$l = 18$	12	1200
	Плити покриття:	$6 \times 1.5$	1	130
		$6 \times 3$	2	250
		$12 \times 1.5$	3.5	200
		$12 \times 3$	7	400
	Смугові панелі зовнішніх стін:	$6 \times 1.2$	2	60
		$6 \times 1.8$	3	100
Одноповерхова середнього типу	Колони:	$H = 8.4$	5	300
		$H = 10.8$	12	600
	Ферми покриття:	$l = 18$	8	500
		$l = 24$	20	1500

## Продовження таблиці 4.5

1	2	3	4
Одноповерхова важкого типу	Колони: $H = 10.8$	10	600
	$H = 18$	20	1500
	Ферми покриття: $l = 24$	20	1200
	$l = 36$	35	2500
	Плити покриття: $12 \times 3$	7	300
Багатоповерхова	Колони: $H = 6.2$	3	660
	$H = 10$	5	1200
	$H = 14.8$	10	1500
	Балки перекриттів: $l = 5$	4	400
	$l = 9$	7	700
	Плити перекриттів: $6 \times 0.75$	0.5	65
	$6 \times 2.5$	1	130
Змішаного типу	Будівельна система включає елементи багатоповерхової будівлі та будівлі середнього типу		

Таблиця 4.6 – Вага основних конструктивних елементів житлових будинків і вміст арматури

Тип будинку	Конструктивні елементи	Вага, т	Вміст арматури, кг
<b>Безкаркасний</b>			
Цегляний	Максимальна вага уламків стін	1,5	–
Дрібноблоковий	Максимальна вага уламків стін	1	–
Крупноблоковий	Максимальна вага уламків стін	2	–
Крупнопанельний	Панелі зовнішніх стін	4	140
<b>Каркасний</b>			
Зі стінами з навісних панелей	Панелі зовнішніх стін	3	100
Зі стінами з кам'яних матеріалів	Максимальна вага уламків стін	1	–
	Колони: $H = 8$ м перерізом $30 \times 30$ см (до 5 поверхів)	2	150
	перерізом $40 \times 40$ см (5-12 поверхів)	2.5	200
	Ригелі каркасу $40 \times 45$ см	2	150
	Плити перекриттів $6 \times 1$ м	2.5	150

Наведені показники завалів використовуються при оцінці інженерної обстановки в зонах руйнувань, а також під час планування заходів щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій.



## 4.2 Обстановка при виробничих аваріях із вибухом

Внаслідок руйнування резервуарів, трубопроводів і технологічного устаткування з горючими речовинами існує можливість їх викиду всередину будівлі або на відкритий майданчик з утворенням газопароповітряної суміші (ГППС). Серйозну небезпеку для персоналу, будівель, споруд і технологічного устаткування становить вибух утвореної ГППС.

Особливо велика ймовірність вибуху ГППС існує на об'єктах нафтохімічної і хімічної промисловості, де зберігаються та використовуються значні об'єми горючих газів (ГГ) і легкозаймистих рідин (ЛЗР). У зв'язку з цим необхідно розглянути механізм вибухового горіння і викласти методику прогнозування параметрів вибухового горіння ГППС.

Перш ніж приступити до викладу основного матеріалу і методик, доцільно уточнити основні поняття і визначення.

Процес горіння із стрімким вивільненням енергії та утворенням при цьому надмірного тиску (більше 5 кПа) називається *вибуховим горінням*.

Розрізняють два принципово різних режими вибухового горіння: *дефлаграційний* і *детонаційний*.

При дефлаграційному горінні поширення полум'я відбувається зі швидкостями, значно нижчими за швидкість звуку; при цьому тиск у незначній мірі зростає.

При детонаційному горінні (детонація) поширення полум'я відбувається зі швидкістю, що є близькою до швидкості звуку або перевищує її.

*Ініціація (запалювання) газоповітряної суміші з утворенням осередку горіння* є можливою за наступних умов:

– концентрація горючого газу в газоповітряній суміші повинна бути в діапазоні між нижньою і верхньою концентраційними межами поширення полум'я;

– енергія запалювання від іскри гарячої поверхні повинна бути не нижче мінімальної. Для більшості вибухових сумішей енергія запалювання не перевищує 30 Дж.

*Нижня концентраційна межа ( $C_{нкм}$ ) поширення полум'я* – це така концентрація горючого газу в суміші з окислювальним середовищем, нижче за яку суміш стає нездатною до поширення полум'я.

*Верхня концентраційна межа ( $C_{вкм}$ ) поширення полум'я* – це така концентрація горючого газу в суміші з окислювальним середовищем, вище за яку суміш стає нездатною до поширення полум'я.

*Мінімальна енергія ініціації (запалювання) ( $E_i$ )* – найменше значення енергії електричного розряду, здатне запалити суміш стехіометричного складу.

*Концентрація газу стехіометричного складу ( $C_{сх}$ )* – концентрація горючого газу в суміші з окислювальним середовищем, при якому забезпечується повна без залишку хімічна взаємодія горючого і окислювача суміші.

При згоранні газоповітряної суміші стехіометричного складу утворюються тільки кінцеві продукти реакції горіння і, при цьому, теплота їх згорання не витрачається на нагрівання незгорілих окислювача або горючого, які не утворюються. З цієї причини продукти згорання нагріваються до максимальної температури.

У разі дефлаграційного горіння такої суміші в замкнутому герметичному і теплоізолюваному об'ємі утворюються максимальна температура і тиск. Величина максимального тиску є характеристикою відповідної газоповітряної суміші.

Режим дефлаграційного горіння може переходити в режим детонаційного горіння (в разі швидкого зростання швидкості поширення полум'я). Такому переходу сприяє турбулізація процесу горіння при зустрічі фронту полум'я з перешкодами. При цьому поверхня фронту полум'я стає нерівною, а товщина полум'я збільшується – все це викликає зростання швидкості поширення полум'я.

У режимі детонаційного горіння навантаження значно зростають. Тому *режим детонаційного горіння прийнятий за розрахунковий випадок для прогнозування інженерної обстановки при аваріях із вибухом.*

До основних чинників, що впливають на параметри вибуху, відносяться: маса і тип вибухонебезпечної речовини, її параметри й умови зберігання або використання в технологічному процесі, місце виникнення вибуху, об'ємно-планувальні рішення в місці вибуху.

Вибухи на промислових підприємствах і базах зберігання можна розділити на дві групи – у відкритому просторі та у виробничих приміщеннях.

У відкритому просторі на промислових підприємствах і базах зберігання можливі вибухи газоповітряних сумішей (ГПС), що утворюються у випадку руйнування резервуарів зі стиснутими і зрідженими під тиском або охолодженням (в ізотермічних резервуарах) газами, а також у разі аварійного розливу легкозаймистих рідин.

У виробничих приміщеннях, разом із вибухом ГПС, можливі також вибухи пилоповітряних сумішей (ППС), що утворюються у процесі роботи технологічних установок.

#### **4.2.1 Вибух газоповітряних сумішей у відкритому просторі**

З метою проведення розрахунків з гарантованим запасом за обсягом аварійно-рятувальних робіт, під час обґрунтування початкових даних приймають такий випадок руйнування резервуара, при якому вибух газоповітряної суміші призводить до максимальної вражаючої дії. Цей випадок відповідає руйнуванню того резервуара, в якому зберігається максимальна кількість горючої речовини на даному об'єкті.

Коротко розглянемо моделі дії, що визначають поля вражаючих чинників (тисків) при прогнозуванні наслідків вибухів газоповітряних сумішей.

При вибуху газоповітряних сумішей розрізняють дві зони дії: детонаційної хвилі – в межах хмари ГПС, і повітряної ударної хвилі – за межами

хмари ГПС. У зоні хмари діє детонаційна хвиля, надмірний тиск у фронті якої приймається постійним у межах хмари ГПС і приблизно рівним  $\Delta P = 17 \text{ кгс/см}^2$  (1,7 МПа).

У розрахунках приймають, що зона дії детонаційної хвилі обмежена радіусом  $r_0$ , який визначається з припущення, що ГПС після руйнування ємності утворює у відкритому просторі півсферичну хмару.

Об'єм півсферичної хмари може бути визначений за формулою:

$$V = \frac{2}{3} \pi r_0^3, \text{ м}^3.$$

Враховуючи, що кіломоль ідеального газу за нормальних умов займає  $22,4 \text{ м}^3$ , об'єм утвореної ГПС при аварійній ситуації складе:

$$V = 100 \cdot 22,4 \cdot \frac{kQ}{m_k C}, \text{ м}^3,$$

де  $k$  – коефіцієнт, що враховує частку активного газу (частку продукту, що бере участь у вибуху);  $Q$  – кількість зріджених вуглеводневих газів у сховищі до вибуху, кг;  $C$  – стехіометрична концентрація газу в % за об'ємом (таблиця 4.7);  $m_k$  – молярна маса газу, кг/кмоль.

Виходячи з умови рівності півсфери та об'єму утвореної суміші, радіус зони дії детонаційної хвилі можна обчислити за наступною формулою:

$$r_0 \approx 10^3 \sqrt[3]{\frac{kQ}{m_k C}}, \text{ м.} \quad (4.17)$$

При підстановці значень для метану  $m_k = 16$  і  $C = 9,45$  (див. табл. 4.7), отримаємо формулу:

$$r_0 \approx 18,5^3 \sqrt[3]{kQ}, \text{ м,} \quad (4.18)$$

де  $Q$  – кількість метану до вибуху в тоннах.

Дана формула набула широкого поширення у випадку проведення розрахунків щодо визначення наслідків вибухів для вуглеводневих газів.

Значення коефіцієнта  $k$  приймають залежно від способу зберігання продукту:

$k = 1$  – для резервуарів із газоподібною речовиною;

$k = 0,6$  – для газів, зріджених під тиском;

$k = 0,1$  – для газів, зріджених охолодженням (що зберігаються в ізо-термічних ємностях);

$k = 0,05$  – при аварійному розливі легкозаймистих рідин.

Таблиця 4.7 – Характеристики газопароповітряних сумішей

Речовина, що характеризує суміш	Формула речовини, що утворює суміш	Характеристики суміші			
		$m_k$ , кг/кмоль	$\rho_{смх}$ , кг/м <sup>3</sup>	$Q_{смх}$ , МДж/кг	$C$ , об. %
Газоповітряні суміші					
Аміак	CH <sub>3</sub>	15	1,180	2,370	19,72
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26	1,278	3,387	7,75
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58	1,328	2,776	3,13
Бутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56	1,329	2,892	3,38
Вінілхлорид	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> Cl	63	1,400	2,483	7,75
Водень	H <sub>2</sub>	2	0,933	3,425	29,59
Дивініл	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54	1,330	2,962	3,68
Метан	CH <sub>4</sub>	16	1,232	2,763	9,45
Окисел вуглецю	CO	28	1,280	2,930	29,59
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44	1,315	2,801	4,03
Пропілен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42	3,314	2,922	4,46
Етан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30	1,250	2,797	5,66
Етилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28	1,285	3,010	6,54
Пароповітряні суміші					
Ацетон	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O	58	1,210	3,112	4,99
Бензин авіаційний		94	1,350	2,973	2,10
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78	1,350	2,937	2,84
Гексан	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86	1,340	2,797	2,16
Дихлоретан	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Cl <sub>2</sub>	99	1,49	2,164	6,54
Діетиловий ефір	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O	74	1,360	2,840	3,38
Ксилол	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	106	1,355	2,830	1,96
Метанол	CH <sub>4</sub> O	32	1,300	2,843	12,30
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72	1,340	2,797	2,56
Толуол	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92	1,350	2,843	2,23
Циклогексан	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84	1,340	2,797	2,28
Етанол	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	46	1,340	2,804	6,54

Зона дії повітряної ударної хвилі починається відразу за зовнішньою межею хмари ГПС. Тиск у фронті повітряної ударної хвилі  $\Delta P_\phi$  залежить від відстані до центру вибуху і визначається за рис. 4.3 або за таблицею 4.8, виходячи зі співвідношення:

$$\Delta P_\phi = f\left(\frac{r}{r_0}\right), \quad (4.19)$$

де  $r$  – відстань від центру вибуху до точки, що розглядається.

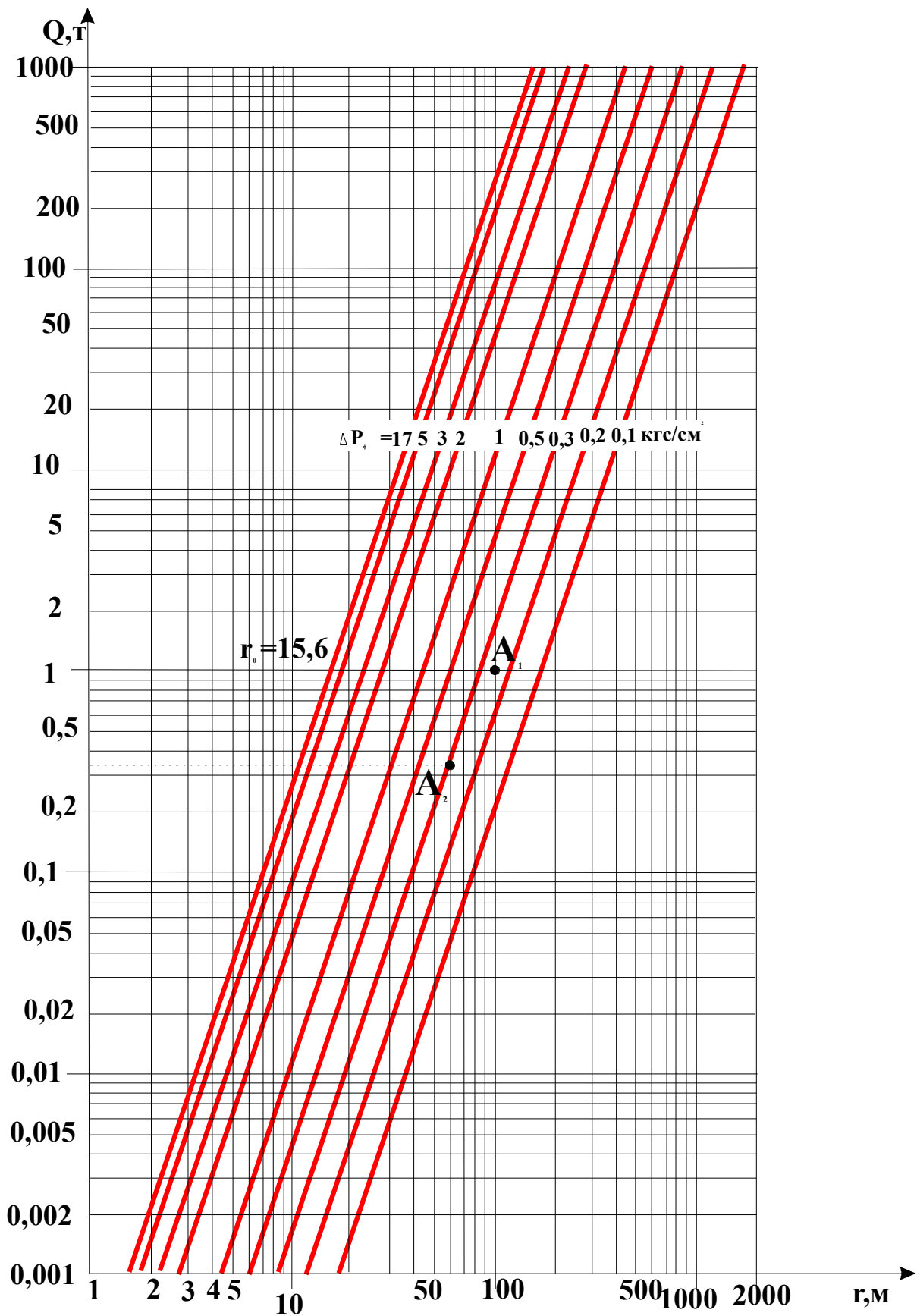


Рисунок 4.3 – Зміни значень  $\Delta P_\phi$  (кгс/см<sup>2</sup>) при вибуху пропанобутанових ГПС залежно від маси зрідженого газу  $Q$  (τ) і відстані  $r$  (м)

Таблиця 4.8 – Залежність тиску у фронті повітряної ударної хвилі від співвідношення  $r / r_0$

$r / r_0$	0–1	1,01	1,04	1,08	1,2	1,4	1,8	2,7
$\Delta P_\phi$ , кПа	1700	1232	814	568	400	300	200	100

$r / r_0$	3	4	5	6	8	12	20
$\Delta P_\phi$ , кПа	80	50	40	30	20	10	5

Таблиця 4.8 і рис. 4.3 апроксимують відомі формули, що характеризують залежність тиску від відстані до центру вибуху.

*Приклад:*

1. Визначити  $r_0$  і значення  $\Delta P_\phi$  на відстані 100 м у випадку розлиття і вибуху ГПС  $Q = 1000$  кг. На перетині вертикальної лінії  $r = 100$  м з горизонтальною  $Q = 1000$  кг (1 т) отримаємо точку  $A_1$ , що відповідає  $\Delta P_\phi = 0,25$  кгс/см<sup>2</sup>;  $r_0 = 15,6$  м.

2. Визначити значення  $Q$ , при якому об'єкт, що витримує навантаження  $\Delta P_\phi = 0,3$  кгс/см<sup>2</sup> і розташований на відстані 60 м від центру вибуху, не буде зруйнований. На перетині вертикальної лінії  $r = 60$  м з похилою  $\Delta P_\phi = 0,3$  кгс/см<sup>2</sup> отримаємо точку  $A_2$ , якій відповідає  $Q = 320$  кг.

*Приклад розрахунку*

Нехай стався вибух хмари ГПС, утвореної через руйнування резервуара з 106 кг зрідженого пропану.

*Початкові дані:*  $Q = 10^6$  кг;  $k = 0,6$ ;  $m_k = 44$ ;  $C = 4,03\%$ .

Необхідно визначити тиск повітряної ударної хвилі на відстані  $r = 200$  м від центру вибуху.

*Розрахунок:*

$$1. r_0 = 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{Q \cdot k}{m_k \cdot C}} = 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{10^6 \cdot 0,6}{44 \cdot 4,03}} = 150 \text{ м.}$$

$$2. \frac{r}{r_0} = \frac{200}{150} = 1,3.$$

$$3. \text{ При } \frac{r}{r_0} = 1,3 \text{ за табл. 4.7 } \Delta P_\phi = 350 \text{ кПа (3,5 кгс/см}^2\text{)}.$$

## 4.2.2 Вибухи газоповітряних і пилоповітряних сумішей у виробничих приміщеннях

Аварії з вибухом виникають, як правило, на пожежовибухонебезпечних об'єктах. До пожежовибухонебезпечних об'єктів відносяться об'єкти, на території або у приміщеннях яких знаходяться (обертаються) горючі гази, легкозаймисті рідини і горючий пил у такій кількості, що можуть утворювати вибухонебезпечні горючі суміші, під час горіння яких надлишковий тиск у приміщенні може перевищити 5 кПа.

Наслідки вибуху на пожежовибухонебезпечних підприємствах визначаються залежно від умови розміщення вибухонебезпечних продуктів. Якщо продукти розміщуються поза приміщеннями, то приймається, що аварія розвивається за сценарієм вибуху у відкритому просторі.

Якщо технологічний апарат з вибухонебезпечними продуктами розміщений в будівлях, то аварія розвивається за сценарієм вибуху в замкнутому об'ємі.

Коротко розглянемо моделі дії, що дозволяють визначити поля тисків при прогнозуванні наслідків вибухів у виробничих приміщеннях.

Найбільш типовими аварійними ситуаціями в цьому випадку вважаються:

- руйнування апарату або трубопроводу зі змішаними газами або рідинами;
- втрата герметичності трубопроводів (розрив зварного шва, прокладки, відрив штуцера);
- розлив рідин по підлозі приміщення або по рельєфу місцевості;
- утворення або викид горючого пилу.

В цьому випадку газо-, паро-, пилоповітряна суміш займе частково або повністю весь об'єм приміщення. Потім цей об'єм замінюється розрахунковою сферою (на відміну від півсфери у відкритому просторі), радіус якої визначається з урахуванням об'єму приміщення, типу і маси небезпечної суміші. При прогнозуванні наслідків вважають, що процес у приміщенні розвивається в режимі детонації.

### 4.2.2.1 Вибухи газопароповітряних сумішей

При вибуху газопароповітряних сумішей (ГППС) зону детонаційної хвилі, обмежену радіусом  $r_0$ , можна визначити за формулою:

$$r_0 = \frac{1}{24} \sqrt[3]{E}, \text{ м}, \quad (4.20)$$

де  $1/24$  – коефіцієнт,  $\text{м}/\text{кДж}^{1/3}$ ;  $E$  – енергія вибуху суміші, що визначається з наступного виразу:

$$E = V_{\text{ГППС}} \rho_{\text{стх}} Q_{\text{стх}}, \text{ кДж}, \quad (4.21)$$

де  $V_{\text{ГППС}}$  – об'єм суміші, який дорівнює

$$V_{ГППС} = \frac{V_2}{C}, \quad (4.22)$$

де  $V_2$  – об'єм газу у приміщенні;  $C$  – стехіометрична концентрація горючого по об'єму в % (табл. 4.7);  $\rho_{смх}$  – щільність суміші стехіометричного складу, кг/м<sup>3</sup> (табл. 4.7);  $Q_{смх}$  – енергія вибухового перетворення одиниці маси суміші стехіометричного складу, кДж/кг;  $V_0$  – вільний об'єм приміщення, що дорівнює  $V_0 = 0,8 \cdot V_n$ , м<sup>3</sup>;  $V_n$  – об'єм приміщення; при  $V_{ГППС} > V_0$  об'єм суміші  $V_{ГППС}$  приймають рівним  $V_0$ .

У нормативній літературі по вибухозахисту будівель вибухонебезпечних виробництв існують спеціальні методики з визначення маси та об'єму газу, що поширюється у приміщенні при аварійній ситуації. Ці методики передбачають ретельне вивчення технологічного процесу. Для оперативного прогнозування наслідків вибуху у виробничих приміщеннях розрахунки доцільно проводити для випадку, при якому будуть максимальні руйнування, тобто коли вільний об'єм приміщення, де розташовані ємності з газом, буде повністю заповнений вибухонебезпечною сумішшю стехіометричного складу.

Тоді рівняння (4.21) для визначення енергії вибуху можна записати у вигляді:

$$E = 100 \frac{V_0 \rho_{смх} Q_{смх}}{C}, \text{ кДж.} \quad (4.23)$$

Далі приймається, що за зоною детонаційної хвилі з тиском 17 кгс/см<sup>2</sup> діє повітряна ударна хвиля. Тиск у фронті повітряної ударної хвилі визначається з використанням даних таблиці 4.8 або рис. 4.3.

#### *Приклад розрахунку*

Нехай стався вибух етилено-повітряної суміші в разі розгерметизації технологічного блоку всередині виробничого приміщення.

*Початкові дані:*  $V_n = 1296$  м<sup>3</sup>;  $\rho_{смх} = 1,285$  кг/м<sup>3</sup>;  $Q_{смх} = 3,01$  МДж/кг;  $C = 6,54$  %.

Необхідно визначити тиск ударної хвилі на відстані 30 м від контуру приміщення у випадку руйнування його огорожувальних конструкцій.

*Розрахунок:*

$$1. E = \frac{100 \cdot V_0 \cdot \rho_{смх} \cdot Q_{смх}}{C} = \frac{100 \cdot 0,8 \cdot 1296 \cdot 1,285 \cdot 3,01 \cdot 10^3}{6,54} = 61,3 \cdot 10^6 \text{ кДж.}$$

$$2. r_0 = \frac{1}{24} \cdot \sqrt[3]{E} = \frac{1}{24} \cdot \sqrt[3]{61,3 \cdot 10^6} = 16,3 \text{ м.}$$

$$3. \frac{r}{r_0} = \frac{30 + 16,3}{16,3} = 2,8.$$

$$4. \text{ При } \frac{r}{r_0} = 2,8 \text{ за табл. 4.7 } \Delta P_\phi = 93 \text{ кПа (0,93 кгс/см}^2\text{).}$$



#### 4.2.2.2 Вибухи пилоповітряних сумішей

У випадку порушення герметичності технологічних апаратів пил викидається в приміщення, де разом із пилом, що накопичився, змішується з повітрям, утворюючи пилоповітряну суміш (ППС), здатну горіти. Іскровий розряд призводить до вибухового горіння суміші.

На відміну від газових сумішей, утворення вибухонебезпечної хмари пилу у приміщенні може відбуватися у процесі самого горіння. Перед вибухом у більшості випадків трапляються локальні мікробибухи в устаткуванні, резервуарах, і займання в окремих ділянках будівлі, що викликає струшування пилу, який осів на підлозі, стінах та інших будівельних конструкціях і устаткуванні. Це призводить до утворення вибухонебезпечних концентрацій пилу у всьому об'ємі приміщення, вибух якого викликає сильні руйнування.

Вибухове горіння може відбуватися в одному із двох режимів – дефлаграційному або детонаційному.

При оперативному прогнозуванні наслідків приймають, що процес розвивається в детонаційному режимі.

Зону детонаційної хвилі, обмежену радіусом  $r_0$ , можна визначити за формулою (4.20), в якій енергія вибуху визначається з виразу:

$$E = mQ, \text{ кДж}, \quad (4.24)$$

де  $Q$  – питома теплота згорання речовини, що утворила пил, кДж/кг (табл. 4.9);  $m$  – розрахункова маса пилу, кг.

Таблиця 4.9 – Показники вибухових явищ пилу

Речовина	$\varphi_{нкм}$ , г/м <sup>3</sup>	$Q$ , МДж/кг
Полістирол	27,5	39,8
Поліетилен	45,0	47,1
Метилцелюлоза	30,0	11,8
Поліоксадіазол	18,0	18,0
Пігмент зелений (фарбник)	45,0	42,9
Пігмент бордо на поліетилені	39,0	42,9
Нафталін	2,5	39,9
Фталієвий ангідрид	12,6	21,0
Уротропін	15,0	28,1
Адипінова кислота	35,0	19,7
Сіра	2,3	8,2
Алюміній	58,0	30,13

При оперативному прогнозуванні розрахункова маса пилу визначається з урахуванням умови, що вільний об'єм приміщення буде повністю заповнений зваженим дисперсним продуктом, утворюючи при цьому пилоповітряну суміш стехіометричної концентрації:

$$m = \frac{V_0 C}{1000}, \text{ кг}, \quad (4.25)$$

де  $V_0$  – вільний об'єм приміщення, що дорівнює  $V_0 = 0,8 \cdot V_n$ , м<sup>3</sup>;  $V_n$  – об'єм приміщення, м<sup>3</sup>;  $C$  – стехіометрична концентрація пилу, г/м<sup>3</sup>,

$$C \approx 3\varphi_{\text{НКМ}}, \quad (4.26)$$

де  $\varphi_{\text{НКМ}}$  – нижня концентраційна межа поширення полум'я (мінімальний вміст пилу в суміші з повітрям, при якому можливий спалах).

Значення  $\varphi_{\text{НКМ}}$  для різних речовин знаходиться в наступних межах:

- для неорганічних речовин (сіра, фосфор)  $\varphi_{\text{НКМ}} = 2 - 30 \text{ г/м}^3$ ;
- для пластмас  $\varphi_{\text{НКМ}} = 20 - 100 \text{ г/м}^3$ ;
- для пестицидів і фарбників  $\varphi_{\text{НКМ}} = 30 - 300 \text{ г/м}^3$ ;
- для вовни  $\varphi_{\text{НКМ}} = 100 - 200 \text{ г/м}^3$ .

Значення характеристик деяких аерозолів наведені в таблиці 4.9.

Тиск у фронті повітряної ударної хвилі визначається з використанням даних таблиці 4.7.

#### *Приклад розрахунку*

У цеху з переробки поліетилену при розгерметизації технологічного блоку можливе надходження пилу у приміщення.

*Початкові дані:*  $V_n = 4800 \text{ м}^3$ ;  $\varphi_{\text{НКМ}} = 45 \text{ г/м}^3$ ;  $Q = 47,1 \text{ МДж/кг}$ .

Необхідно визначити тиск ударної хвилі на відстані 30 м від контуру приміщення при руйнуванні його огорожувальних конструкцій.

*Розрахунок:*

$$1. C = 3 \cdot \varphi_{\text{НКМ}} = 3 \cdot 45 = 135 \text{ г/м}^3.$$

$$2. m = \frac{V_0 \cdot C}{1000} = \frac{0,8 \cdot 4800 \cdot 135}{1000} = 518,4 \text{ кг}.$$

$$3. E = m \cdot Q = 518,4 \cdot 47,1 \cdot 10^3 = 24,4 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

$$4. r_0 = \frac{1}{24} \cdot \sqrt[3]{E} = \frac{1}{24} \cdot \sqrt[3]{24,4 \cdot 10^6} = 12 \text{ м}.$$

$$5. \frac{r}{r_0} = \frac{30 + 12}{12} = 3,5.$$

$$6. \text{ При } \frac{r}{r_0} = 3,5 \text{ за табл. 4.7 } \Delta P_\phi = 65 \text{ кПа (0,65 кгс/см}^2\text{)}.$$

### **4.2.3 Прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті**

Наказом Міністерства внутрішніх справ України від 29 листопада 2019 року за № 1000 затверджена «Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті» (Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 14 травня 2020 р. за № 440/34723).

Методику розроблено з метою вдосконалення порядку оцінки хімічної обстановки шляхом прогнозування масштабів забруднення в разі виникнення аварії з виливом (викидом) небезпечних хімічних речовин (НХР) із технологічних ємностей на хімічно небезпечних об'єктах (ХНО), автомобільному, річковому, залізничному та трубопровідному транспорті.

Методику призначено для використання органами управління та силами цивільного захисту єдиної державної системи цивільного захисту, які організують, здійснюють та забезпечують заходи із запобігання надзвичайним ситуаціям, ліквідації аварій, пов'язаних з виливом (викидом) НХР, та їх наслідків.

Методика дає змогу здійснити довгострокову (оперативну) та аварійну оцінку обстановки в разі виникнення аварій, пов'язаних з виливом (викидом) НХР із технологічних ємностей на ХНО, автомобільному, річковому, залізничному (під час перебування в нерухомому стані) та трубопровідному транспорті. Цю Методику може бути використано для проведення розрахунків у разі виникнення аварії на морському транспорті, якщо хмара НХР може дістатись берегової смуги.

Методика поширюється на НХР, які в разі виникнення аварії переходять у навколишнє середовище в газоподібному, пароподібному та аерозольному агрегатних станах із утворенням первинної та/або вторинної хмари, та не поширюється на НХР, які не переходять у газоподібний, пароподібний або аерозольний стани.

Терміни, використані у цій Методиці, вживаються в таких значеннях:

- *вторинна хмара небезпечних хімічних речовин* – хмара НХР, яка утворюється внаслідок випаровування розлитої НХР з поверхні;
- *гранично допустима концентрація небезпечної хімічної речовини (ГДК)* – максимальна кількість НХР у повітрі, що вимірюється в одиниці об'єму або маси, яка в разі постійного контакту з людиною або впливу на неї за визначений проміжок часу практично не впливає на здоров'я людини та не викликає несприятливих наслідків;
- *закритий рельєф місцевості* – великі міста, гори, ліси віком 30 років та більше;
- *зона можливого хімічного забруднення (ЗМХЗ)* – територія або акваторія, у межах якої в разі зміни напрямку вітру можливе переміщення хмари НХР із концентрацією, небезпечною для життя людини;
- *зона хімічного забруднення (ЗХЗ)* – територія або акваторія, у межі якої потрапили НХР у концентраціях або кількостях, що протягом певного

часу створюють небезпеку для життя та здоров'я людей і завдають шкоди навколишньому природному середовищу. ЗХЗ є сукупністю забруднених площ району аварії та площ, утворених первинною та/або вторинною хмарою НХР;

➤ *ізотермія* – ступінь вертикальної стійкості повітря у приземному шарі, за якого температура поверхні ґрунту дорівнює температурі повітря на висоті 1–10 м від поверхні. Зазвичай спостерігається у хмарну погоду і за снігового покриву;

➤ *інверсія* – ступінь вертикальної стійкості повітря у приземному шарі, за якого температура поверхні ґрунту менша за температуру повітря на висоті 1–10 м від поверхні. Виникає в ясну погоду за малої швидкості вітру (до 4 м/с) приблизно за годину до заходу сонця та зникає упродовж години після сходу сонця;

➤ *конвекція* – ступінь вертикальної стійкості повітря у приземному шарі, за якого температура поверхні ґрунту більша за температуру повітря на висоті 1–10 м від поверхні. Виникає в ясну погоду за малої швидкості вітру (до 4 м/с) приблизно через 2 години після сходу сонця і руйнується приблизно за 2–2,5 години до заходу сонця;

➤ *небезпечна хімічна речовина (НХР)* – хімічна речовина, безпосередня або опосередкована дія якої на людину може спричинити загибель, гостре або хронічне захворювання людей, завдання шкоди навколишньому середовищу;

➤ *первинна хмара небезпечних хімічних речовин* – хмара НХР, яка утворюється внаслідок миттєвого (1–2 хв) переходу в атмосферу всього об'єму ємності з НХР або її частини;

➤ *порогова токсодоза  $PC_{t50}$*  – найменша інгаляційна токсодоза НХР, що викликає в людини, яка не забезпечена засобами захисту органів дихання, початкові симптоми ураження;

➤ *прогнозована зона хімічного забруднення (ПЗХЗ)* – розрахункова зона в межах зони можливого хімічного забруднення;

➤ *прогнозування* – завчасне визначення ймовірності виникнення і динаміки розвитку надзвичайних ситуацій на підставі аналізу можливих причин їх виникнення, які зумовлені дією джерел надзвичайних ситуацій у минулому і на тепер, та оцінювання можливих наслідків;

➤ *руйнування хімічно небезпечного об'єкта* – стан хімічно небезпечного об'єкта, за якого внаслідок катастрофи або стихійного лиха сталася повна розгерметизація всіх ємностей і руйнування технологічних комунікацій;

➤ *хімічно небезпечна адміністративно-територіальна одиниця* – адміністративно-територіальна одиниця (АТО), до якої зараховуються область, район, а також будь-які населені пункти, що потрапляють у зону можливого хімічного забруднення в разі виникнення аварії на хімічно небезпечному об'єкті;

➤ *хімічно небезпечний об'єкт (ХНО)* – об'єкт, на якому використовують, переробляють, зберігають або транспортують НХР, у разі аварії на якому чи під час руйнування якого можуть загинути чи отримати ушкодження люди, а також це може призвести до хімічного забруднення навколишнього середовища.

*Оцінка та прогнозування наслідків аварій*

*Оцінка хімічної обстановки передбачає визначення:*

- масштабів хімічного забруднення;
- ступеня небезпеки хімічного забруднення;
- тривалості хімічного забруднення.

*Основними показниками, що визначають масштаб хімічного забруднення, є:*

- радіус  $R_A$ , (км) та площа  $S_A$  (км<sup>2</sup>) району аварії;
- глибина  $\Gamma_1$  (км) та площа  $S_1$  (км<sup>2</sup>) поширення первинної хмари НХР;
- глибина  $\Gamma_2$  (км) та площа  $S_2$  (км<sup>2</sup>) поширення вторинної хмари НХР.

Радіус району аварії  $R_A$  (радіус кола, що визначає зовнішні кордони району аварії) залежить від виду НХР й умов її зберігання (використання). Під час проведення розрахунків значення  $R_A$  приймається:

– для зріджених газів та рідких НХР із низькою температурою кипіння, що зберігаються в технологічних ємностях об'ємом до 100 т, – 0,5 км, в інших випадках – 1 км;

– для рідких НХР із високою температурою кипіння в разі руйнування технологічних ємностей об'ємом до 100 т – 0,2–0,3 км, в інших випадках – 0,5 км.

У разі виникнення пожежі радіус району аварії необхідно збільшувати в 1,5–2 рази, що обумовлено можливістю викиду більшої кількості НХР, а також розкидання НХР внаслідок вибуху.

Значення глибини поширення первинної хмари для деяких НХР  $\Gamma_{T_1}$  (км), наведені в таблиці Д3.1 додатка 3 (значення не охоплюють радіус району аварії  $R_A$ ), зазначено для типових ємностей, у яких зберігається НХР, за умови їх повної розгерметизації, значення порогової токсодози  $PC_{t50}$  та поширення хмари на відкритій рівнинній місцевості.

Загалом глибина поширення первинної хмари НХР  $\Gamma_1$ , з урахуванням метеорологічних та топографічних умов, впливу температури повітря на кількість НХР, що переходить у первинну хмару, визначається за формулою:

$$\Gamma_1 = \Gamma_{T_1} K_{t_1} K_K K_M, \quad (4.27)$$

де  $\Gamma_{T_1}$  – табличне значення глибини поширення первинної хмари (км);  $K_{t_1}$  – поправний коефіцієнт, що враховує вплив температури повітря на глибину поширення первинної хмари НХР. Значення поправного коефіцієнта  $K_{t_1}$ , що враховує вплив температури повітря на глибину поширення первинної хмари НХР, наведені в таблиці Д3.2 додатка 3;  $K_K$  – коефіцієнт пропорційності, що враховує розбіжності заданої маси НХР із типовими масами НХР, наведені в

таблиці ДЗ.1 додатка 3. Для його визначення розраховується співвідношення заданої маси НХР  $Q_3$  (т) до найближчого значення типової маси НХР  $Q_T$  (т). Значення коефіцієнта пропорційності  $K_K$  залежить від величини співвідношення  $Q_3/Q_T$  та ступеня вертикальної стійкості повітря у приземному шарі. Ступені вертикальної стійкості повітря у приземному шарі наведено в таблиці ДЗ.3 додатка 3. Значення коефіцієнта пропорційності  $K_K$  залежно від ступеня вертикальної стійкості повітря у приземному шарі наведені в таблиці ДЗ.4 додатка 3;  $K_M$  – коефіцієнт впливу місцевості. Значення коефіцієнта  $K_M$  визначається із урахуванням комплексного показника  $K_P$ . Значення коефіцієнта впливу місцевості  $K_M$  наведені в таблиці ДЗ.5 додатка 3. Значення комплексного показника  $K_P$  наведені в таблиці ДЗ.6 додатка 3.

Під час розрахунків слід ураховувати, що якщо напрямок руху хмари НХР збігається з напрямком міських транспортних магістралей, то глибина поширення хмари НХР визначається як для степової місцевості, а якщо напрямок вітру не збігається з напрямком міських транспортних магістралей або за відсутності останніх (у населених пунктах із безсистемною забудовою), то глибина поширення хмари НХР визначається за даними для лісної місцевості змішаного типу, зазначеними в таблиці ДЗ.6 додатка 3.

Для НХР, дані про які відсутні в таблиці ДЗ.1 додатка 3, глибина поширення первинної хмари НХР на рівнинній місцевості  $\Gamma_{1p}$  (км) визначається за формулою:

$$\Gamma_{1p} = b_1 \left( \frac{Q_1}{u_1 PC_{t50}} \right)^a, \quad (4.28)$$

де  $Q_1$  – кількість НХР, що переходить у первинну хмару (т);  $u_1$  – швидкість вітру на висоті 1–10 м (м/с);  $PC_{t50}$  – значення порогової токсодози ( $\text{г} \times \text{с} / \text{м}^2$ ). Фізико-хімічні властивості деяких НХР зазначені в таблиці ДЗ.7 додатку 3 або визначаються за формулою (4.31);  $a$  та  $b_1$  – коефіцієнти, що залежать від вертикальної стійкості повітря у приземному шарі:

$$a = 0,57 \exp(0,86 \varepsilon), \quad (4.29)$$

$$b_1 = 15,4 \exp(6,96 \varepsilon), \quad (4.30)$$

де  $\varepsilon$  – параметр вертикальної стійкості повітря у приземному шарі, що дорівнює: для ізотермії – 0; для конвекції – мінус 0,1–мінус 0,2; для інверсії – 0,1–0,2.

Чисельні значення порогової токсодози  $PC_{t50}$  визначаються за формулою:

$$PC_{t50} = 14,4 \times ГДК \times K, \quad (4.31)$$

де  $ГДК$  – гранично допустима концентрація речовини в повітрі ( $\text{мг} / \text{м}^3$ ). Довідкова інформація про деякі НХР наведена в таблиці ДЗ.8 додатка 3, за потреби

для визначення ГДК окремих НХР можна використовувати науково-технічну та довідкову літературу, відповідні національні та міжнародні стандарти тощо;  $K$  – поправний коефіцієнт: для НХР подразнювальної дії дорівнює 5, для НХР отруйної дії – 9.

Розрахунок за формулою (4.28) проводиться для оцінки глибини поширення первинної хмари НХР у приземному шарі атмосфери на відстані до 15–20 км у разі аварійних викидів від однієї ємності або групи ємностей, близько розташованих одна від одної.

Залежно від агрегатного стану НХР визначається можливість утворення первинної/вторинної хмари.

У разі утворення лише первинної хмари кількість НХР, що перейшла в первинну хмару  $Q_1$  (кг), дорівнює загальній кількості НХР  $Q$  (кг).

Якщо можливе утворення вторинної хмари, кількість НХР, що перейшла в первинну хмару  $Q_1$  (кг), визначається за формулою:

$$Q_1 = \frac{QC_v(t_a - t_k)}{\lambda}, \quad (4.32)$$

де  $Q$  – загальна кількість НХР у ємності (кг);  $C_v$  – питома теплоємність рідини (кДж/кг $\times$ °С);  $t_a$  – температура НХР у рідкому стані до руйнування ємності (°С);  $t_k$  – температура кипіння НХР (°С);  $\lambda$  – питома теплота випаровування (кДж/кг).

Вплив типу місцевості на значення глибини поширення первинної хмари НХР вираховується шляхом множення величини  $\Gamma_{1p}$  на коефіцієнт впливу місцевості  $K_M$ .

Тоді глибина поширення первинної хмари НХР  $\Gamma_1$  (км) з урахуванням типу місцевості визначається за формулою:

$$\Gamma_1 = K_M \Gamma_{1p}. \quad (4.33)$$

Значення глибини поширення вторинної хмари для деяких НХР  $\Gamma_{T_2}$  (км), наведені в таблиці Д3.9 додатка 3 (значення не охоплюють радіус району аварії  $R_A$ ), зазначено для типових ємностей, у яких зберігається НХР, за умови їх повної розгерметизації, значення порогової токсодози  $PC_{t50}$  та поширення хмари на відкритій рівнинній місцевості.

Глибина поширення розрахована для середніх умов, у разі глибокої інверсії глибина поширення збільшується в 1,5–2 рази.

З урахуванням метеорологічних та топографічних умов, впливу температури повітря на кількість НХР, що переходить у вторинну хмару, глибина поширення вторинної хмари НХР  $\Gamma_2$  (км) визначається за формулою

$$\Gamma_2 = \Gamma_{T_2} K_{t_2} K_K K_M, \quad (4.34)$$

де  $\Gamma_{T_2}$  – табличне значення глибини поширення вторинної хмари;  $K_{t_2}$  – поправний коефіцієнт, що враховує вплив температури повітря. Значення поправного коефіцієнта  $K_{t_2}$ , що враховує вплив температури повітря на глибину поширення вторинної хмари НХР, наведені в таблиці ДЗ.10 додатка 3;  $K_K$  – коефіцієнт пропорційності, що враховує розбіжності заданої маси НХР із типовими масами НХР, зазначені в таблиці ДЗ.9 додатка 3. Визначення коефіцієнта  $K_K$  здійснюється так, як і у разі поширення первинної хмари НХР;  $K_M$  – коефіцієнт впливу місцевості. Визначення коефіцієнта  $K_M$  здійснюється так, як і у разі поширення первинної хмари НХР.

Для НХР, дані про які відсутні в таблиці ДЗ.9 додатка 3, глибина поширення вторинної хмари НХР  $K_{2p}$  (км) на рівнинній місцевості визначається за формулою:

$$\Gamma_{2p} = b_2 T^{-0,5} \left( \frac{Q_2(T)}{u_1 PC_{t50}} \right)^a, \quad (4.35)$$

де  $Q_2(T)$  – кількість НХР (т), що випарувалася за час  $T$ ;  $u_1$  – швидкість вітру на висоті 1–10 м (м/с);  $PC_{t50}$  – значення порогової токсодози ( $\text{г} \times \text{с} / \text{м}^2$ ). Фізико-хімічні властивості деяких НХР зазначені в таблиці ДЗ.7 додатка 3 або визначаються за формулою (4.31);  $T$  – час (год), за який визначається глибина поширення вторинної хмари НХР. У разі оцінювання максимальної глибини поширення вторинної хмари НХР:

$$\begin{aligned} T &= T_{\text{вип}}, \text{ якщо } T_{\text{вип}} \leq 24 \text{ год,} \\ T &= 24 \text{ год, якщо } T_{\text{вип}} > 24 \text{ год,} \end{aligned}$$

де  $T_{\text{вип}}$  – час випаровування НХР із поверхні площі виливу (год);  $a$  та  $b_2$  – розмірні коефіцієнти, що залежать від вертикальної стійкості повітря:

коефіцієнт  $a$  визначається за формулою (4.29);

$$b_2 = 16,84 \exp(6,87\varepsilon), \quad (4.36)$$

де  $\varepsilon$  – параметр вертикальної стійкості повітря у приземному шарі, що дорівнює: для ізотермії – 0; для конвекції – мінус 0,1–мінус 0,2; для інверсії – 0,1–0,2.

Кількість НХР, що перейшла у вторинну хмару  $Q_2$  (кг), визначається за формулою:

$$Q_2 = Q - Q_1, \quad (4.37)$$



Час випаровування НХР  $T_{вип}$  (год) з площі поверхні виливу визначається за формулою:

$$T_{вип} = \frac{Q_2}{3600ES_{np}}, \quad (4.38)$$

де  $E$  – питома швидкість випаровування ( $\text{кг}/\text{м}^2 \times \text{с}$ ), та визначається за формулою (4.42);  $S_{np}$  – площа поверхні виливу НХР ( $\text{м}^2$ ).

Площа поверхні виливу визначається за формулою

$$S_{np} = \frac{\pi d_{np}^2}{4}, \quad (4.39)$$

де  $d_{np}^2$  – приведений діаметр площі поверхні виливу НХР (м).

Приведений діаметр площі поверхні виливу НХР  $d_{np}$  (м) визначається за формулою

за наявності піддона (обвалування):

$$d_{np} = 1,22 \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (4.40)$$

за відсутності піддона (обвалування):

$$d_{np} = 5,04 \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (4.41)$$

де  $1,22$  та  $5,04$  – розмірні коефіцієнти ( $\text{м}^{0,5}$ );  $Q$  – кількість НХР у ємності (кг);  $Q_1$  – кількість НХР, що перейшла в первинну хмару (кг), визначається за формулою (4.32);  $\rho$  – густина НХР ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ).

У формулі (4.40) висота піддона (обвалування) дорівнює 1 м, у разі його заповнення на 85 %. Для ємностей об'ємом більше 2000 т висота піддона (обвалування) може бути більшою. У цьому разі приведений діаметр площі поверхні виливу НХР для ємностей об'ємом більше 2000 т за наявності піддона (обвалування) визначається за формулою

$$d_{np} = \frac{1,22}{H} \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (4.42)$$

де  $H$  – висота піддона (обвалування) (м).

Питома швидкість випаровування  $E$  ( $\text{кг}/\text{м}^2 \times \text{с}$ ) визначається за формулою

$$E = 0,041 \frac{u_1 M}{d_{np}^{0,14} T_6} \exp \left[ \frac{\lambda M}{R} \left( \frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_6} \right) \right], \quad (4.43)$$

де  $u_1$  – швидкість повітря на висоті 1–10 м (м/с);  $M$  – молекулярна маса НХР (г/моль);  $d_{np}$  – приведений діаметр площі поверхні виливу НХР (м);  $T_k$  – температура кипіння НХР (К);  $T_6$  – температура випаровування НХР (К);  $\lambda$  – питома теплота випаровування (кДж/кг);  $R$  – універсальна газова стала, що дорівнює 8,31 кДж/кмоль $\times$ К.

Вплив місцевості на значення глибини поширення вторинної хмари НХР вираховується шляхом множення величини  $\Gamma_2$  на коефіцієнт впливу місцевості  $K_M$ , що визначається так, як і у разі поширення первинної хмари НХР.

Площа первинної (вторинної) хмари НХР  $S_{I(2)}$  (км<sup>2</sup>) визначається за формулою

$$S_{I(2)} = \frac{(\Gamma_{I(2)} + R_A)\varphi}{60}, \quad (4.44)$$

де  $\Gamma_{I(2)}$  – глибина поширення первинної (вторинної) хмари НХР (км);  $R_A$  – радіус району аварії (км);  $\varphi$  – половина кута сектора (град), у межах якого можливе поширення хмари НХР із заданою довірчою імовірністю  $P_r$ . Значення кута  $\varphi$  (град) залежно від ступеня вертикальної стійкості повітря у приземному шарі та довірчої імовірності  $P_r$  наведені в таблиці ДЗ.11 додатка 3. Зображення кута сектору наведено на Схемі поширення первинної та вторинної хмари НХР (див. рис. 4.4).

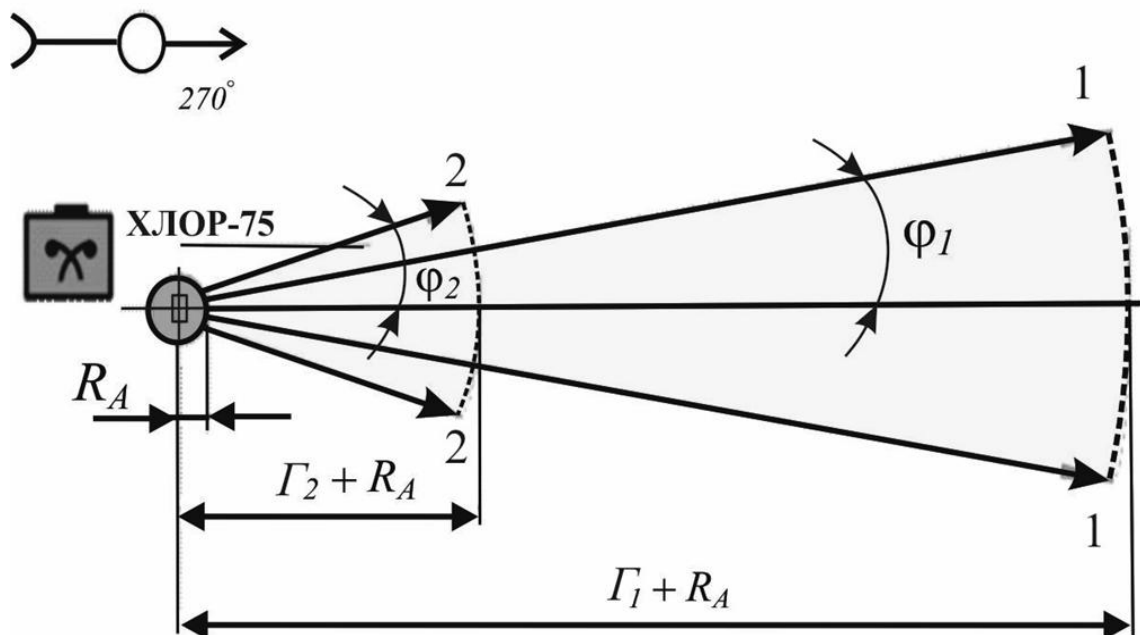


Рисунок 4.4 – Схема поширення первинної та вторинної хмари НХР

Довірча ймовірність РГ визначає характер задач, що вирішуються:

- у разі довгострокового прогнозування  $P_r = 0,9$ ;
- у разі аварійного прогнозування, тобто за наявності всіх вихідних даних про об'єкт в умовах викиду (випливу) НХР  $P_r = 0,5$ ;
- у разі наявності не всіх вихідних даних  $P_r = 0,75$ .

Площа прогнозованої зони хімічного забруднення  $S_{ПЗХЗ}$  (км<sup>2</sup>) визначається залежно від значень радіуса аварії  $R_A$ , глибини поширення  $\Gamma_{1(2)}$  первинної (вторинної) хмари та відповідних кутів сектору поширення цих хмар  $\varphi_{1(2)}$ .

Якщо  $\Gamma_1 < \Gamma_2$ :

$$\text{за умов } \varphi_1 < \varphi_2 \quad S_{ПЗХЗ} = \pi \left( R_A^2 + \frac{(\Gamma_2^2 - R_A^2)\varphi_2}{180} \right) \quad (4.45)$$

$$\text{за умов } \varphi_2 < \varphi_1 \quad S_{ПЗХЗ} = \pi \left( R_A^2 + \frac{(\Gamma_1^2 - R_A^2)\varphi_1}{180} + \frac{(\Gamma_1^2 - \Gamma_2^2)\varphi_2}{180} \right) \quad (4.46)$$

Якщо  $\Gamma_2 < \Gamma_1$ :

$$\text{за умов } \varphi_1 < \varphi_2 \quad S_{ПЗХЗ} = \pi \left( R_A^2 + \frac{(\Gamma_2^2 - R_A^2)\varphi_2}{180} + \frac{(\Gamma_2^2 - \Gamma_1^2)\varphi_1}{180} \right) \quad (4.47)$$

$$\text{за умов } \varphi_2 < \varphi_1 \quad S_{ПЗХЗ} = \pi \left( R_A^2 + \frac{(\Gamma_1^2 - R_A^2)\varphi_1}{180} \right) \quad (4.48)$$

Основним показником, що характеризує ступінь небезпеки хімічного забруднення, є прогнозована кількість уражених, що опинилися в ЗХЗ.

Кількість уражених серед виробничого персоналу об'єкта, де сталася аварія, та населення, яке мешкає поблизу цього об'єкта, визначається відповідно до кількості та часу знаходження людей у ЗХЗ, їх захищеності від дії НХР.

Кількість людей, які опинилися в ЗХЗ, розраховується або шляхом підсумовування кількості виробничого персоналу (населення), який знаходиться на окремих виробничих ділянках (в житлових кварталах, населених пунктах), що піддалися дії НХР, або шляхом множення середньої густини виробничого персоналу (населення), що знаходиться на території об'єкта (населеного пункту), на площу зараженої території.

Відповідно кількість уражених  $B$  (осіб) визначається за формулами:

$$B = L(1 - K_3), \quad (4.49)$$

або

$$B = \Delta S_{об.} (1 - K_3), \quad (4.50)$$

де  $L$  – кількість виробничого персоналу (населення) в осередку ураження (осіб);  $K_3$  – коефіцієнт захищеності виробничого персоналу від вражаючої дії НХР. Коефіцієнт захищеності виробничого персоналу  $K_3$  від дії НХР (за хлором) зазначено в таблиці ДЗ.12 додатка 3. Коефіцієнт захищеності міського та сільського населення  $K_3$  від дії НХР зазначено в таблиці ДЗ.13 додатка 3;  $\Delta$  – середня щільність розміщення виробничого персоналу (населення) на території об'єкта (населеного пункту) (осіб/км<sup>2</sup>);  $S_{об.}$  – площа території об'єкта (населеного пункту), що зазнала ураження (км<sup>2</sup>).

Значення коефіцієнта захищеності  $K_3$  залежить від місця перебування виробничого персоналу (населення) у момент підходу хмари забрудненого повітря до об'єкта (населеного пункту) та захисних властивостей укриття і засобів індивідуального захисту, що використовуються.

Коефіцієнт захищеності  $K_3$  виробничого персоналу (населення) визначається за формулою

$$K_3 = q_1 K_{3_1} + q_2 K_{3_2} + q_3 K_{3_3} + q_4 K_{3_4} + \dots + q_i K_{3_i}, \quad (4.51)$$

де  $q_{(1,2,3,4,\dots,i)}$  – частка виробничого персоналу (населення), що знаходиться в умовах перебування 1, 2, 3, ...  $i$ , наприклад, 1 – виробничий персонал (населення), що знаходиться на відкритій місцевості; 2 – виробничий персонал (населення), який забезпечено протигазами; 3 – виробничий персонал (населення), що знаходиться в укриттях; 4 – виробничий персонал, що знаходиться у виробничих будівлях тощо.

Під час розрахунку враховуються лише ті показники, що мають місце, а за потреби додаються додаткові.

Для визначення кількості уражених від первинної хмари НХР використовується значення коефіцієнта захищеності на час перебування в осередку ураження 15 та 30 хв, наведені в таблиці ДЗ.13 додатка 3.

Тривалість хімічного забруднення характеризується тривалістю уражальної дії НХР та залежить від часу її випаровування з площі виливу та визначення часу підходу хмари НХР до об'єкта.

Час випаровування НХР  $T_{вип}$  (год) з площі виливу розраховується за формулою

$$T_{вип} = T_{вип.маб} K_u, \quad (4.52)$$

де  $T_{вип.маб}$  (год) – час випаровування НХР за швидкості повітря 1 м/с. Час випаровування НХР за швидкості повітря 1 м/с зазначено в таблиці ДЗ.14 додатка 3;

$K_u$  – коефіцієнт, що враховує вплив швидкості вітру на час випаровування НХР. Значення коефіцієнта  $K_u$  залежно від швидкості вітру наведені в таблиці ДЗ.15 додатка 3 або визначаються за формулою

$$K_u = \frac{1}{0,44u + 0,56}, \quad (4.53)$$

де  $u$  – швидкість вітру на висоті 1–10 м (м/с).

Для НХР, дані про які відсутні в таблиці ДЗ.14 додатка 3, час випаровування НХР із площі вилливу  $T_{вин}$  (год) визначається за формулою (4.38).

Час підходу хмари НХР до об'єкта  $t$  (год), що знаходиться в межах зон поширення первинної  $\Gamma_1$  та/або вторинної  $\Gamma_2$  хмар НХР, залежить від швидкості перенесення хмари повітряними потоками та визначається за формулою:

$$t = \frac{x}{v}. \quad (4.54)$$

#### *Порядок проведення довгострокового та аварійного прогнозування*

Залежно від фізико-хімічних властивостей НХР та агрегатного стану, в якому вони зберігаються або перевозяться, розрахунки здійснюються:

- для газів, які зберігаються або перевозяться у зрідженому стані, – окремо за первинною та вторинною хмарами НХР;
- для газів, які зберігаються або перевозяться у стиснутому стані, – тільки за первинною хмарою НХР;
- для НХР, які зберігають або перевозять у рідкому стані та температура кипіння яких є вищою за температуру навколишнього середовища, – тільки за вторинною хмарою НХР.

Площа розливу НХР, залежно від наявності або відсутності піддона (обвалування), визначається за формулою (4.39).

Глибина зони хімічного забруднення  $\Gamma$  визначається як найбільше зі значень  $\Gamma_1$  та  $\Gamma_2$ :

$$\Gamma = \max(\Gamma_1; \Gamma_2) + R_A. \quad (4.55)$$

Усі розрахунки та заходи захисту населення плануються на глибину ПЗХЗ, яка утворюється протягом перших 4 годин із моменту аварії.

Довгострокове прогнозування здійснюється заздалегідь для визначення можливих масштабів забруднення, проведення розрахунку сил та засобів, які залучатимуться для ліквідації наслідків аварії, складання планів роботи та інших довідкових матеріалів.

У разі проведення довгострокового прогнозування визначаються глибина і площа зони можливого хімічного забруднення, глибина і площа прогнозованої зони хімічного забруднення, кількість осіб, що мешкає в ЗМХЗ та ПЗХЗ, можливі втрати людей (осіб), тривалість хімічного забруднення (хв, год, діб).

Глибина зони можливого хімічного забруднення  $\Gamma_{ЗМХЗ}$  (км) та глибина прогнозованої зони хімічного забруднення  $\Gamma_{ПЗХЗ}$  (км) з рівними між собою та визначаються за формулою (4.55).

Площа зони можливого хімічного забруднення  $S_{ЗМХЗ}$  (км<sup>2</sup>) визначається за формулою

$$S_{ЗМХЗ} = \pi\Gamma^2 \approx 3,14\Gamma^2. \quad (4.56)$$

де  $\Gamma$  – кінцевий результат розрахунку зони забруднення, визначається за формулою (4.55).

Площа прогнозованої зони хімічного забруднення  $S_{ПЗХЗ}$  (км<sup>2</sup>) визначається за формулами (4.44–4.48).

Вихідними даними під час довгострокового прогнозування є:

- тип і кількість НХР на об'єкті  $Q$  (т);
- умови зберігання НХР: в ємностях обвалованих (необвалованих), трубопроводах;
- метеоумови;
- характер місцевості: відкрита, закрита, глибина забудови, лісового масиву (км);
- кількість людей на об'єкті (у населеному пункті), що можуть опинитися в зоні можливого забруднення;
- забезпеченість населення засобами захисту (%).

У разі проведення довгострокового прогнозування рекомендується приймати:

- розрахункову кількість НХР – кількість НХР в одиночній максимальній ємності (т), характер розливу НХР – «у піддон» («в обвалування») або «вільно» (залежно від умов зберігання);
- для залізничних станцій, через які здійснюється перевезення НХР, розглядається аварія з виливом 60 т найбільш небезпечної речовини, що транспортується;
- у разі виникнення аварії на газо- та продуктопроводах розрив трубопроводу – «гілйотинний» з максимальною витратою за максимальної тривалості викиду, а кількість НХР, що вилілася, дорівнює максимальній кількості НХР, яка міститься у трубопроводі між автоматичними відсікачами (наприклад, для аміакопроводів – 275–500 т);
- ступінь заповнення ємності (ємностей) – 70 % паспортного об'єму ємності;
- ємність (ємності) з НХР у разі аварії руйнується (руйнуються) повністю;

– метеорологічні умови, за яких площа ЗМХЗ, ПЗХЗ буде найбільшою: стан вертикальної стійкості повітря – інверсія; швидкість повітря – 1 м/с; температура повітря – +20 °С;

– кут поширення хмари забрудненого повітря для ЗМХЗ – 360°, для ПЗХЗ кут визначається відповідно до розрахункових даних. Зони можливого та прогнозованого хімічного забруднення за результатами довгострокового прогнозування наведено на рис. 4.5;

– заходи захисту населення плануються на глибину ЗМХЗ, яка утворюється протягом перших 4 годин.

На карту (схему) наносять місцезнаходження ємностей з НХР, найменування та кількість НХР (т), зону можливого хімічного забруднення, зону прогнозованого хімічного забруднення, спрямовану в бік найбільшої щільності заселення людей, іншу необхідну довідкову інформацію.

Аварійне прогнозування здійснюється під час виникнення аварії для визначення можливих наслідків аварії та організації заходів щодо її ліквідації.

У разі проведення аварійного прогнозування:

– глибина прогнозованої зони хімічного забруднення  $\Gamma_{ПЗХЗ}$  (км) визначається за формулою (4.55);

– площа прогнозованої зони хімічного забруднення  $S_{ПЗХЗ}$  (км<sup>2</sup>) визначається за формулами (4.45–4.48);

– час підходу хмари зараженого повітря до заданого об'єкта (населеного пункту)  $t$  (год) визначається за формулою (4.54);

– можливі втрати людей в осередку хімічного ураження (осіб) визначаються за формулами (4.49, 4.50);

– тривалість хімічного забруднення (год) визначається за формулою (4.52).

Вихідними даними під час аварійного прогнозування є:

– тип і кількість НХР на об'єкті  $Q$  (т);

– метеоумови;

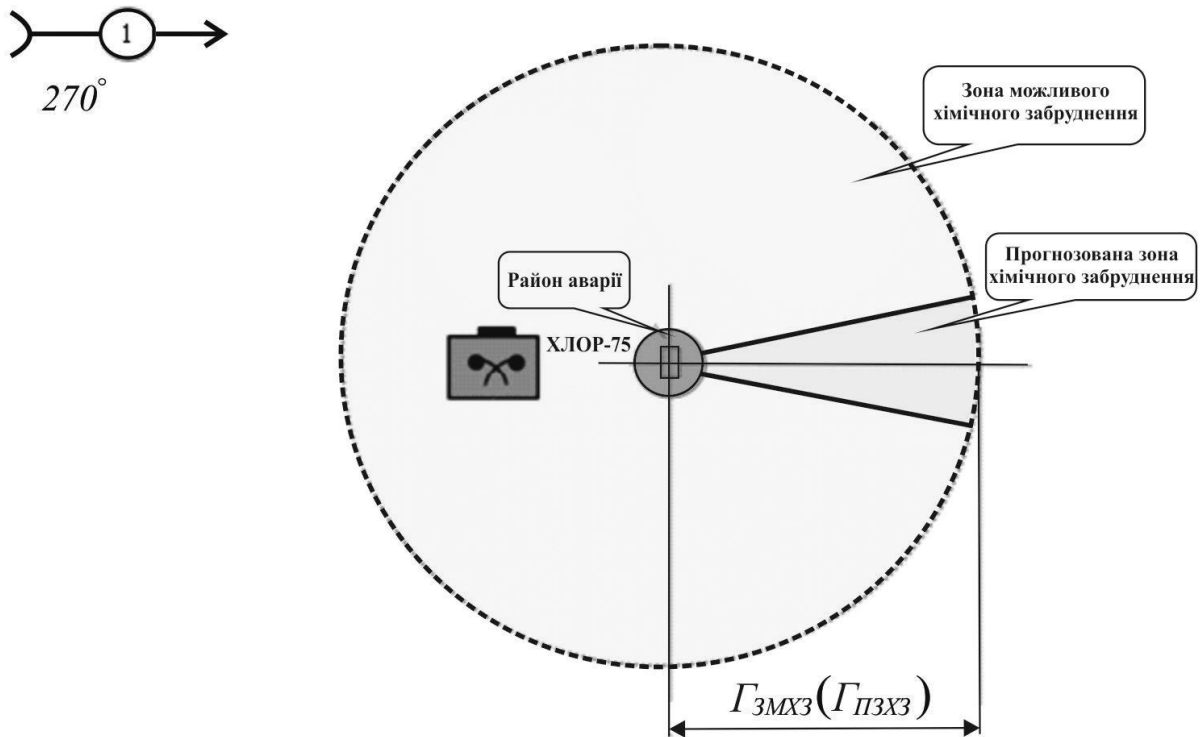
– характер місцевості: відкрита, закрита, глибина забудови, лісового масиву (км);

– кількість людей на об'єкті (у населеному пункті), що можуть опинитися в ПЗХЗ (осіб);

– наявність, стан захисних споруд, забезпеченість населення засобами захисту (%).

Остаточні дані для організації заходів із ліквідації наслідків аварії визначаються за результатами хімічної розвідки.

Прогноз обстановки здійснюється із розрахунку, що граничний час перебування людей у зоні хімічного забруднення та тривалість збереження метеорологічних умов незмінними становить 4 години. Після закінчення цього часу прогноз уточнюється.



**Рисунок 4.5 – Зони можливого та прогнозованого хімічного забруднення за результатами довгострокового прогнозування**

Остаточні дані для організації заходів із ліквідації наслідків аварії визначаються за результатами хімічної розвідки.

Прогноз обстановки здійснюється із розрахунку, що граничний час перебування людей у зоні хімічного забруднення та тривалість збереження метеорологічних умов незмінними становить 4 години. Після закінчення цього часу прогноз уточнюється.

- У разі проведення аварійного прогнозування рекомендується приймати:
- центр ЗХЗ – місце аварії;
  - кількість НХР – фактична на момент аварії в ємності (ємностях), на ділянці трубопроводу між відсікачами (Т);
  - характер розливу – фактичний («у піддон» («в обвалування») або «вільно»);
  - стан обвалування (допускає чи не допускає розтікання);
  - метеорологічні умови – реальні на час виникнення аварії (напрямок (азимут  $A$ ) і швидкість вітру  $V$  (м/с), температура повітря ( $^{\circ}\text{C}$ ), ступінь вертикальної стійкості повітря у приземному шарі);
  - характер місцевості (відкрита, закрита), довжина забудови, лісового масиву;
  - середня щільність населення в місцевості, над якою поширюється хмара, забруднена НХР.



Після отримання необхідної інформації про руйнування та проведення розрахунків на карту (схему) наносять місце та район аварії, глибину поширення (первинної та/або вторинної хмар), площу ПЗХЗ, метеодані, іншу необхідну довідкову інформацію. Зона хімічного забруднення за результатами аварійного прогнозування зображена на рис. 4.6.

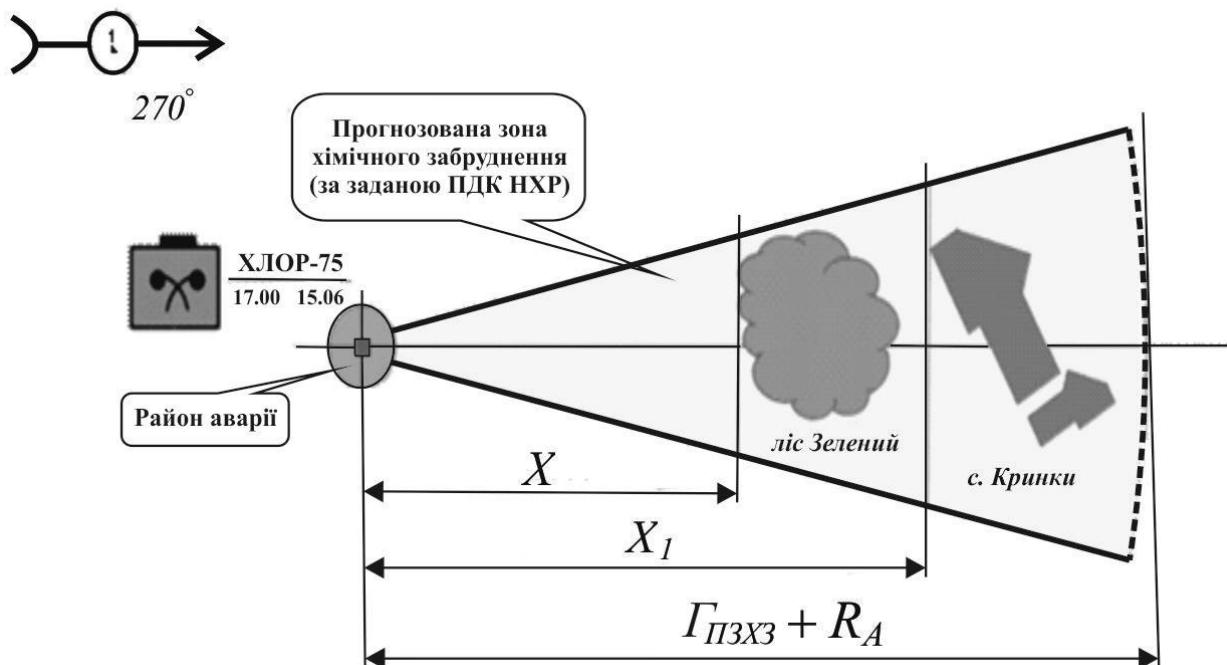


Рисунок 4.6 – Зона хімічного забруднення за результатами аварійного прогнозування

Для визначення фактичної ЗХЗ отримані розрахункові дані уточнюються шляхом проведення хімічної розвідки.

*Класифікація адміністративно-територіальних одиниць (АТО) та об'єктів господарської діяльності за ступенем хімічної небезпеки*

За результатами довгострокового прогнозування можливих масштабів забруднення НХР проводиться класифікація АТО та об'єктів господарської діяльності за ступенем хімічної небезпеки.

Критеріями класифікації АТО та об'єктів щодо їх віднесення до ступеня хімічної небезпеки є частка території, що потрапляє в ЗМХЗ, та кількість населення, що потрапляє в ПЗХЗ у разі виникнення аварії на хімічно небезпечних об'єктах.

Критерії класифікації адміністративно-територіальних одиниць і хімічно небезпечних об'єктів (крім залізниць) зазначені в табл. 4.10.

*Оформлення табло чергового диспетчера хімічно небезпечного об'єкта*

З метою прискорення процесу оцінки обстановки, яка складається в разі виникнення аварії з НХР на ХНО, розробляється табло чергового диспетчера ХНО (далі – табло).

Табло оформлюється на стенді розміром не менше 1,8×2 метри.

На табло у вигляді детальної схеми наносяться:

- місця зберігання НХР із зазначенням кількості ємностей на цих місцях та об'єму кожної ємності;
- межі зони можливого хімічного забруднення з розбивкою за секторами;
- усі технологічні будинки ХНО, де працюють люди;
- підприємства, установи та організації, розташовані в зоні можливого хімічного забруднення на всю глибину цієї зони.

Таблиця 4.10 – Критерії класифікації адміністративно-територіальних одиниць і хімічно небезпечних об'єктів (крім залізниць)

Найменування об'єкта, що класифікується	Критерії класифікації, одиниця виміру	Од. виміру	Чисельне значення критерію, що використовується для класифікації			
			Ступінь хімічної небезпеки			
			IV	III	II	I
Хімічно небезпечний об'єкт	Кількість населення, що потрапляє у прогнозовану зону хімічного забруднення (ПЗХЗ) у разі виникнення аварії на хімічно небезпечному об'єкті	тис. осіб	до 0,1 включно	більше 0,1 до 0,3 включно	більше 0,3 до 3 включно	більше 3
Хімічно небезпечна адміністративно-територіальна одиниця	Частка території, що потрапляє в зону можливого хімічного забруднення (ЗМХЗ) у разі виникнення аварії на хімічно небезпечних об'єктах	%	до 10 включно	більше 10 до 30 включно	більше 30 до 50 включно	більше 50

Якщо на одному табло детальне розташування території ХНО і території, яка опиняється у ЗМХЗ, є неможливим, робиться окремо табло для ХНО і окремо для цієї території.

На табло може бути розміщено будь-яку додаткову інформацію, яка дає змогу скоротити строк прийняття рішення черговим диспетчером.

Зразок оформлення табло чергового диспетчера ХНО наведено на рис. 4.7.

# Зразок

# ТАБЛО чергового диспетчера ХНО

Можливі глибини розповсюдження хмари

Аміак, інверсія			
Кількість, т	Глибина, км		
	-20°C	0°C	+20°C
0,5	<0,5	<0,5	0,5
1	0,5	0,5	0,5
10	2,3	2,45	2,65
30	4,90	5,25	5,45

Аміак, ізотерія			
Кількість, т	Глибина, км		
	-20°C	0°C	+20°C
0,5	<0,2	<0,2	0,2
1	0,2	0,2	0,3
10	1,30	1,45	1,65
30	3,90	3,25	3,45



### Телефони для оповіщення

Назва об'єкта	Телефон	Час підходу хмари, хв
<b>Сектор I</b>		
с. Осикове	32-45-76	23
<b>Сектор II</b>		
ВАТ «Еталон»	33-43-65	18
<b>Сектор III</b>		
ВАТ «Еталон»	32-11-23	15
с. Бурлацьке	34-12-91	26
<b>Сектор IV</b>		
завод «Феросплав»	33-45-91	12
с. Стрийське	35-29-61	22
<b>Сектор V</b>		
завод «Феросплав»	33-45-91	12
<b>Сектор VI</b>		
с. Машівка	33-81-01	28
<b>Сектор VII</b>		
с. Мирне	33-02-01	15
<b>Сектор VIII</b>		
с. Соснове	33-31-21	25

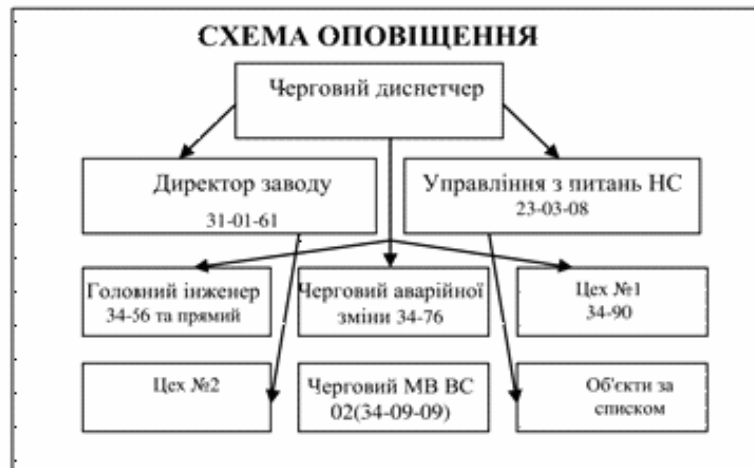
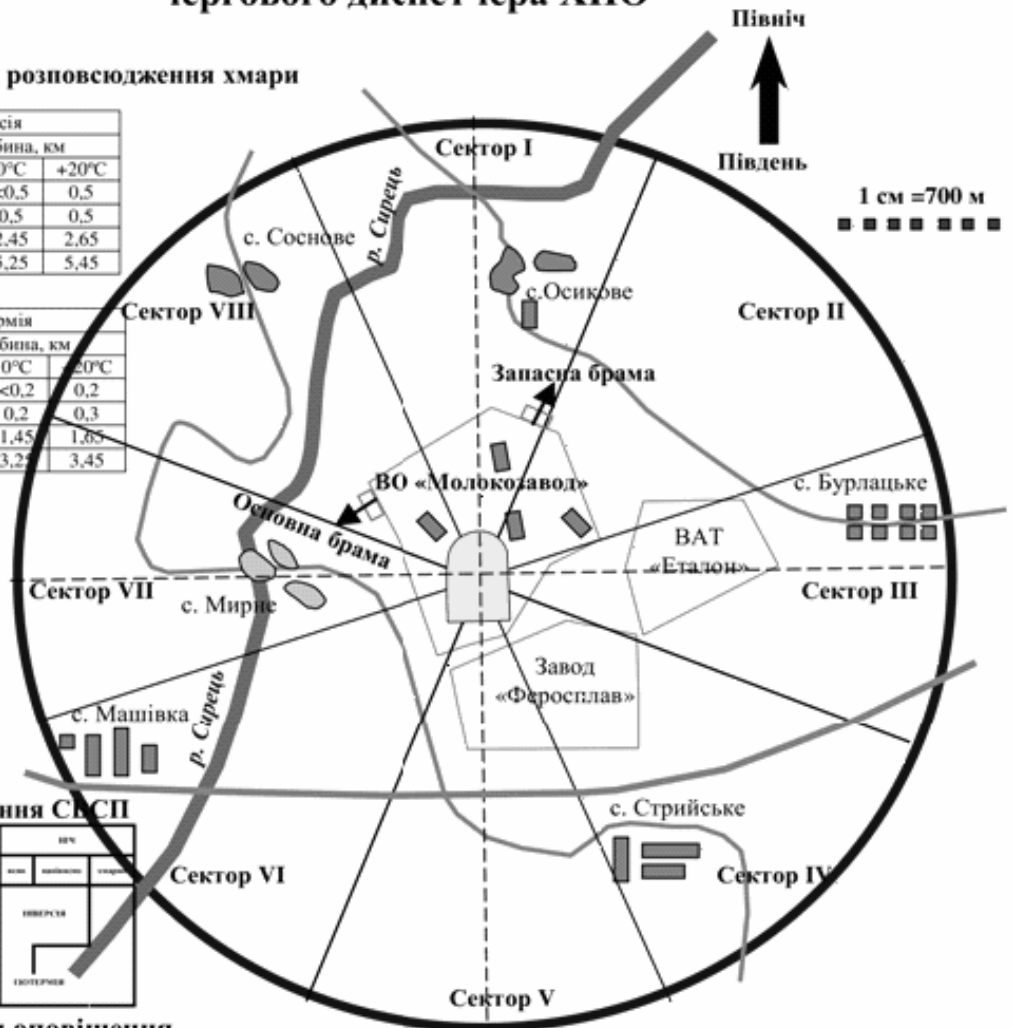


Рисунок 4.7 – Зразок оформлення табло чергового диспетчера хімічно небезпечного об'єкта

#### 4.2.4 Вибухи у випадку аварійної розгерметизації магістрального газопроводу

Розглянемо моделі, що використовуються для визначення параметрів вибуху при аваріях на газопроводах.

Аварії у випадку розгерметизації газопроводів супроводжуються наступними процесами і подіями: виходом газу до спрацьовування відсікаючої арматури (імпульсом на закриття арматури є зниження тиску продукту); закриття відсікаючої арматури; вихід газу з ділянки трубопроводу, відсіченого арматурою.

У місцях пошкодження відбувається вихід газу під високим тиском у навколишнє середовище. На місці руйнування у ґрунті утворюється воронка. Метан піднімається в атмосферу (легший за повітря), а інші гази або їх суміші осідають у приземному шарі. Змішуючись із повітрям, гази утворюють хмару вибухонебезпечної суміші.

Статистика показує, що приблизно 80 % аварій супроводжується пожежею. Іскри виникають у результаті взаємодії частинок газу з металом і твердими частинками ґрунту. Звичайне горіння може трансформуватися у вибух за рахунок самопришвидщення полум'я у випадку його поширення по рельєфу і в лісі.

Отже, вибухове горіння при аваріях на газопроводі може відбуватися також в одному з двох режимів – дефлаграційному або детонаційному. При оперативному прогнозуванні приймають, що процес розвивається в детонаційному режимі.

Дальність поширення хмари (рис. 4.8) вибухонебезпечної суміші за напрямком вітру визначається за емпіричною формулою:

$$L = 25 \sqrt{\frac{M}{W}}, \text{ м}, \quad (4.57)$$

де  $M$  – масова секундна витрата газу, кг/с; 25 – коефіцієнт пропорційності, що має розмірність  $\text{м}^3/2/\text{кг}^{1/2}$ ;  $W$  – швидкість вітру, м/с.

Тоді межа зони детонації, обмежена радіусом  $r_0$ , в результаті виходу газу внаслідок порушення герметичності газопроводу, може бути визначена за формулою:

$$r_0 = 12,5 \sqrt{\frac{M}{W}}, \text{ м}. \quad (4.58)$$

Масова секундна витрата газу  $M$  з газопроводу для критичного режиму виходу, коли основні його параметри (витрата і швидкість виходу) залежать тільки від параметрів розгерметизованого трубопроводу, може бути визначена за формулою:

$$M = \mu \Psi F \sqrt{\frac{P_2}{V_2}}, \text{ кг/с}, \quad (4.59)$$

де  $\Psi$  – коефіцієнт, що враховує витрату газу від стану потоку (для звукової швидкості виходу  $\Psi=0,7$ );  $F$  – площа отвору виходу, що приймається рівною площі перерізу трубопроводу, м<sup>2</sup>;  $\mu$  – коефіцієнт витрат, що враховує форму отвору ( $\mu=0,7\dots0,9$ ), в розрахунках приймається  $\mu=0,8$ ;  $P_2$  – тиск газу в газопроводі, Па;  $V_2$  – питомий об'єм газу, що транспортується, при параметрах в газопроводі (визначається за формулою 4.60).

$$V_2 = R_0 \frac{T}{P_2}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (4.60)$$

де  $T$  – температура газу, що транспортується, К;  $R_0$  – питома газова постійна, що визначається за складовими  $q_k$  і молярними масами компонентів суміші зі співвідношення:

$$R_0 = 8314 \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_k}{m_k} \right)_i, \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{К}), \quad (4.61)$$

де 8314 – універсальна газова постійна, Дж/(кмоль $\times$ К);  $m_k$  – молярна маса компонентів, кг/кмоль;  $n$  – кількість компонентів газу.

У зоні дії детонаційної хвилі тиск приймається рівним 1,7 МПа. Тиск у фронті повітряної ударної хвилі на різній відстані від газопроводу визначається з використанням даних таблиці 4.8.

При прогнозуванні наслідків аварії на газопроводі зону детонації та зону дії повітряної ударної хвилі приймають з урахуванням напрямку вітру. При цьому вважають, що межа зони детонації поширюється від трубопроводу за напрямком вітру на відстань  $2r_0$  (рис. 4.8).

У разі завчасного прогнозування, зона детонації визначається у вигляді смуг уздовж всього трубопроводу шириною  $2r_0$ , розташованих з обох його боків. Це пов'язано з тим, що хмара вибухонебезпечної суміші може поширюватися в будь-яку сторону від трубопроводу, залежно від напрямку вітру. За межами зони детонації по обидві сторони від трубопроводу знаходяться зони дії повітряної ударної хвилі. На плані місцевості ці зони також мають вид смугових ділянок уздовж трубопроводу.

Слід зауважити, що на планах місцевості уздовж магістральних нафто- і газопроводів також наносяться зони можливих сильних руйнувань, межі яких визначаються величиною надлишкового тиску 50 кПа.

При проведенні оперативних розрахунків слід враховувати, що, залежно від класу магістрального трубопроводу, робочий тиск газу  $P_2$  може скла-

дати: для газопроводів високого тиску – 2,5 МПа; середнього тиску – від 1,2 до 2,5 МПа; низького тиску – до 1,2 МПа. Діаметр газопроводу може бути від 150 до 1420 мм.

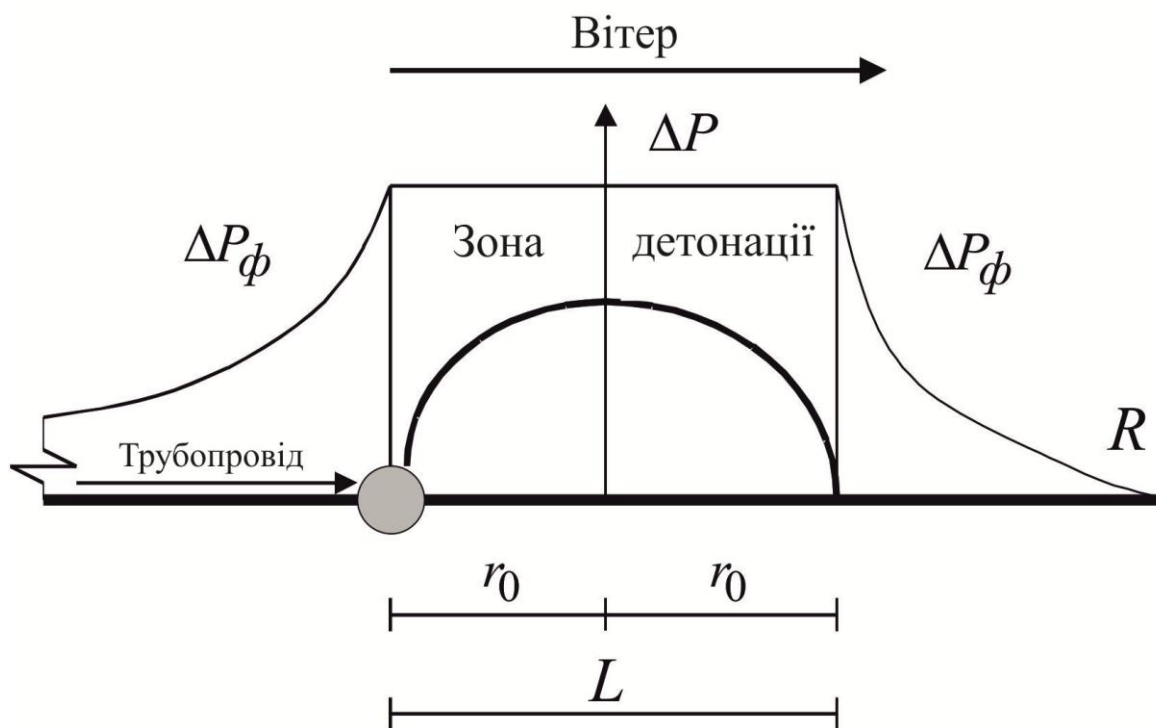


Рисунок 4.8 – Розрахункова схема з визначення тиску при аварії на газопроводі:

$\Delta P$  – тиск у зоні детонації;  $\Delta P_\phi$  – тиск у фронті повітряної ударної хвилі;  $r_0$  – радіус зони детонації;  $R$  – відстань від розрахункового центру вибуху

Температура газу, що транспортується, може бути взята в розрахунках  $t = 40$  0С. Склад звичайного газу, за відсутності даних, може бути прийнятий у співвідношенні: метан (СН4) – 90 %; етан (С2Н6) – 4 %; пропан (С3Н8) – 2 %; Н-бутан (С4Н10) – 2 %; ізопентан (С5Н12) – 2 %.

#### Приклад розрахунку радіуса зони детонації

Початкові дані:

Діаметр трубопроводу  $d = 0,5$  м;  $P_2 = 1,9$  МПа;  $t = 40$  0С;  $W = 1$  м/с;  
 $\mu = 0,8$ .

Розрахунок:

$$1. R_0 = 8314 \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_k}{m_k} \right)_i = 8314 \cdot \left( \frac{0,9}{16} + \frac{0,04}{30} + \frac{0,02}{44} + \frac{0,02}{58} + \frac{0,02}{72} \right) = 486 \text{ Дж}/(\text{кг} \times \text{К}).$$

$$2. V_2 = R_0 \cdot \frac{T}{P_2} = \frac{486 \cdot (273 + 40)}{1,9 \cdot 10^6} = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$3. M = \Psi \cdot F \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{P_2}{V_2}} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 0,8 \cdot \sqrt{\frac{1,9 \cdot 10^6}{0,08}} = 536 \text{ кг/с}.$$

$$4. r_0 = 12,5 \cdot \sqrt{\frac{M}{W}} = 12,5 \cdot \sqrt{\frac{536}{1}} = 289 \text{ м}.$$

#### 4.2.5 Вибух конденсованих вибухових речовин

Параметри вибуху конденсованих вибухових речовин (ВР) визначаються залежно від виду ВР, ефективної маси, характеру підстиляючої поверхні й відстані до центру вибуху. Розрахунок проводять у два етапи. Спочатку визначають приведений радіус  $\bar{R}$ , а потім надлишковий тиск  $\Delta P_\phi$ .

Приведений радіус зони вибуху  $\bar{R}$  може бути визначений за формулою:

$$\bar{R} = \frac{r}{\sqrt[3]{2 \cdot \eta \cdot Q \cdot k_{ef}}}, \text{ м/кг}^{1/3},$$

де  $r$  – відстань до центру вибуху ВР, м;  $\eta$  – коефіцієнт, що враховує характер підстиляючої поверхні та приймається рівним: для металу – 1; для бетону – 0.95; для ґрунту і дерева – 0.6÷0.8;  $Q$  – маса ВР, кг;  $k_{ef}$  – коефіцієнт приведення даного виду ВР до тротилу (приймається за таблицею 4.11).

Таблиця 4.11 – Значення коефіцієнта  $k_{ef}$

Вид ВР	Тротил	Тритонал	Гексоген	Амонал	Порох	Тетрил
$k_{ef}$	1	1.53	1.3	0.99	0.66	1.15

Залежно від величини приведенного радіуса надмірний тиск може бути визначений за однією з наступних формул:

$$\Delta P_\phi = \frac{700}{3 \cdot \left( \sqrt{1 + \bar{R}^3} - 1 \right)}, \text{ кПа, при } \bar{R} \leq 6,2; \quad (4.62)$$

$$\Delta P_\phi = \frac{70}{\bar{R} \cdot \sqrt{\lg \bar{R} - 0,332}}, \text{ кПа, при } \bar{R} > 6,2. \quad (4.63)$$

#### 4.2.6 Прогнозування обстановки при аваріях із вибухом на пожежо-вибухонебезпечних об'єктах

Зони руйнувань можна визначити за рекомендаціями, що наведені в п.п. 4.2.1–4.2.4. Обстановку в зоні руйнувань прийнято оцінювати показниками, які можуть бути розділені на дві групи:

- показники, що безпосередньо характеризують інженерну обстановку;
- показники, що визначають обсяг аварійно-рятувальних робіт і життєзабезпечення населення.

Для прогнозування обстановки на пожежовибухонебезпечних об'єктах рекомендується на план об'єкту нанести зони з радіусами, відповідно рівними  $\Delta P_{\phi} = 100; 50; 30; 20; 10$  кПа.

При оперативному прогнозуванні можна виділити чотири зони руйнувань:

- повних руйнувань ( $\Delta P_{\phi} \geq 50$  кПа);
- сильних руйнувань ( $30 \leq \Delta P_{\phi} < 50$  кПа);
- середніх руйнувань ( $20 \leq \Delta P_{\phi} < 30$  кПа);
- слабких руйнувань ( $10 \leq \Delta P_{\phi} < 20$  кПа).

#### 4.2.7 Показники інженерної обстановки при виробничих аваріях із вибухом

До основних показників інженерної обстановки відносять:

- кількість будівель, що отримали повні, сильні, середні та слабкі руйнування;
- об'єм завалу;
- кількість ділянок, що вимагають зміцнення (обвалення) ушкоджених або зруйнованих конструкцій;
- кількість аварій на комунально-енергетичних мережах (КЕМ);
- довжину завалених проїздів.

Окрім основних показників, при оцінці інженерної обстановки можуть визначатися допоміжні показники, до яких відносяться:

- дальність розльоту уламків від контуру будівлі;
- висота завалу;
- максимальна вага уламків;
- максимальний розмір уламків.

Розглянемо порядок визначення показників, що характеризують інженерну обстановку. Для надзвичайних ситуацій, спричинених вибухами, при оперативному прогнозуванні обстановки прийнято розглядати чотири ступені руйнування будівель – слабкі, середні, сильні та повні (таблиця 4.12).

*Кількість будівель, що отримали повні, сильні, середні та слабкі руйнування, визначають шляхом зіставлення тиску, який характеризує міцність будівель, і тиску, який характеризує дію вибуху.*



Таблиця 4.12 – Характеристика ступенів руйнування будівель

Ступені руйнування	Характеристика руйнування
Слабкі	Часткове руйнування внутрішніх перегородок, покрівлі, дверних і віконних коробок, легких споруд та ін. Основні несучі конструкції зберігаються. Для повного відновлення потрібний капітальний ремонт.
Середні	Руйнування меншої частини несучих конструкцій. Велика частина несучих конструкцій зберігається і лише частково деформується. Може зберігатися частина конструкцій (стіни), що захищають, проте при цьому другорядні та несучі конструкції можуть бути частково зруйновані. Будівля виводиться з ладу, але може бути відновлена.
Сильні	Руйнування більшої частини несучих конструкцій. При цьому можуть зберігатися найміцніші елементи будівлі, каркаси, ядра жорсткості, частково стіни і перекриття нижніх поверхів. У випадку сильного руйнування утворюється завал. Відновлення можливе з використанням частин, що збереглися, і конструктивних елементів. В більшості випадків відновлення є недоцільним.
Повні	Повне обвалення будівлі, від якої можуть зберегтися тільки ушкоджені (або неушкоджені) підвали і незначна частина міцних елементів. При повному руйнуванні утворюється завал. Будівля відновленню не підлягає.

У таблиці 4.13 наведено інтервали тиску, що викликає той або інший ступінь руйнування житлових і виробничих будівель при вибухах ВР і горючих сумішей. Дані, наведені в таблиці, являють собою апроксимацію законів певних ступенів руйнування будівель у вигляді ступінчастої функції.

Вибухи на об'єктах, що містять менше 10 тонн горючих газів, справляють вплив на обмеженій площі.

При цьому в більшості випадків будівлі повністю не руйнуються. До таких випадків відносяться також вибухи в окремих приміщеннях великих будівель. Оцінку характеру руйнування будівель у цьому випадку можна провести в наступній послідовності:

1. Визначити відстань  $r$  від передбачуваного місця вибуху до основних елементів будівлі.

2. Обчислити межі зони  $r_0$  детонаційної хвилі.

3. Визначити величину надлишкового тиску  $\Delta P_\phi$  в місцях розміщення елементів конструкцій.

4. Якщо  $\Delta P_\phi \geq |\Delta P_\phi|$ , то елемент вважається таким, що вийшов з ладу.

Значення  $|\Delta P_\phi|$  визначаються за таблицею 4.14.

Потім за характером руйнування окремих елементів будівлі роблять висновки про ступінь руйнування будівлі в цілому. При цьому використовуються відомі описи ступенів руйнування будівлі.

Таблиця 4.13 – Ступені руйнування будівель від надлишкового тиску при вибухах горючих сумішей

Типи будівель	Ступені руйнування і надлишковий тиск, кПа			
	слабкі	середні	сильні	повні
Цегляні й кам'яні: малоповерхові багатоповерхові	8–20 8–15	20–35 15–30	35–50 30–45	50–70 45–60
Залізобетонні великопанельні: малоповерхові багатоповерхові	10–30 8–25	30–45 25–40	45–70 40–60	70–90 60–80
Залізобетонні монолітні: багатоповерхові підвищеної поверховості	25–50 25–45	50–115 45–105	115–180 105–170	180–250 170–215
Залізобетонні великопанельні із залізобетонним і металевим каркасом та устаткуванням крана вантажопідйомністю, в тоннах: до 50 від 50 до 100	5–30 15–45	30–45 45–60	45–75 60–90	75–120 90–135
Будівлі зі стінами типу "Сендвіч" і устаткуванням крана вантажопідйомністю до 20 тонн	10–30	30–50	50–65	65–105
Складські приміщення з металевим каркасом і стінами з листового металу	5–10	10–20	20–35	35–45

Об'єм завалу повністю зруйнованої будівлі визначають за формулою (4.12).

Об'єм завалу будівлі, що отримала сильний ступінь руйнування, приймають рівним половині від об'єму завалу повністю зруйнованої будівлі.

Таблиця 4.14 – Граничні значення тиску  $|\Delta P_\phi|$ , що викликає різні ступені руйнувань окремих конструктивних елементів будівель

$ \Delta P_\phi $ , кПа	Елементи будівлі
0,5–3,0	Часткове руйнування скла
3,0–7,0	Повне руйнування скла
12,0	Перегородки, віконні і дверні рами
15,0	Перекрыття
30,0	Цегляні та блокові стіни
70,0	Металеві колони
90,0	Залізобетонні колони

Кількість ділянок, що вимагають зміцнення (обвалення) пошкоджених або зруйнованих конструкцій, приймають з розрахунку: одна ділянка на будівлю, яка отримала сильне руйнування.

Кількість аварій на КЕМ приймають рівним числу зруйнованих введень комунікацій в будівлю (електро-, газо-, тепло- і водопостачання). Крім того,

перевіряється можливість руйнування головних елементів комунікацій та ліній постачання. Введення комунікації вважається зруйнованим, якщо будівля отримала повний або сильний ступінь руйнування. За відсутності початкових даних можна прийняти, що кожна будівля має чотири введення комунікацій.

*Довжина завалених проїздів* оцінюється з урахуванням ширини вулиць і дальності розльоту уламків. За відсутності даних ширина вулиць приймається рівною:

- 30 м – для магістральних;
- 18 м – для районних;
- 10–12 м – для проїздів і провулків.

*Дальність розльоту уламків* зруйнованих будівель визначається для оцінки заваленості під'їздів. Дальність розльоту уламків приймають рівним половині висоти будівлі.

*Висота завалу* обчислюється для вибору способу проведення рятувальних робіт. Розрахунки висоти завалу виконують за формулою (4.15).

*Максимальну вагу і розмір уламків*, визначальну вантажопідйомність і виліт стріли кранів можна прийняти відповідно до таблиці 4.15.

До основних показників, що впливають на обсяги пошуково-рятувальних робіт і життєзабезпечення населення, відносяться:

- загальна кількість постраждалих людей;
- кількість постраждалих, що опинилися в завалі;
- кількість людей, що опинилися без даху (для житлових районів);
- потреба в тимчасовому житлі;
- пожежна обстановка в зоні руйнувань;
- радіаційна і хімічна обстановка в районі аварії.

Таблиця 4.15 – Максимальна вага і розміри уламків будівель

Тип будівлі	Проліт будівлі, м	Максимальна вага, т	Максимальний розмір, м	
Виробниче одноповерхове легкого типу	6	3	Колони до 7,2 т	
	12	5		
	18	12		
	середнього типу	18	8	Колони до 10,8 т
		24	20	
		24	20	
важкого типу	24	20	Колони до 18 т	
	36	35		
Виробниче багатоповерхове	6–9	10	Колони до 14,8 т	
Житлове	6	2,5	Колони до 8 т Плити – 6	

Коротко розглянемо рекомендації із прогнозування цих показників.

При вибухах на об'єктах люди уражаються безпосередньо повітряною ударною хвилею, осколками скла та уламками будівель, що отримали повні й сильні руйнування, значна частина людей може опинитися в завалах.

На підставі аналізу матеріалів аварій, що сталися, основним чинником, який визначає втрати, є ступінь ушкодження будівель. Приймається, що:

– у повністю зруйнованих будівлях є постраждалими 100 % людей, що знаходяться в них; при цьому вважають, що всі постраждалі знаходяться в завалах;

– у сильно зруйнованих будівлях є постраждалими до 60 % людей, що знаходяться в них; при цьому вважають, що 50 % з числа постраждалих можуть опинитися в завалі й можуть бути ураженими уламками, стеклами і тиском у хвилі;

– у будівлях, які отримали середні руйнування, є постраждалими до 10-15 % людей, що знаходяться в них.

Тоді *максимальна кількість постраждалих людей* в будівлях становитиме:

$$N_{заг.б} = N_{пов.р} + 0,6N_{сил.р} + 0,15N_{сер.р}, \quad (4.64)$$

де  $N_{пов.р}$ ,  $N_{сил.р}$ ,  $N_{сер.р}$  – кількість людей, що знаходяться в будівлях, які отримали відповідно повні, сильні та середні руйнування.

*Загальну кількість постраждалих людей, розміщених на відкритій місцевості*, можна визначити з виразу:

$$N_{заг.в} = d\varphi \sum_i P_i F_i, \quad (4.65)$$

де  $d$  – частка людей, які у момент вибуху можуть опинитися в небезпечній зоні поза будівлями (за відсутності даних величина  $d$  може бути прийнята рівною 0,05);  $\varphi$  – щільність населення, осіб/км<sup>2</sup>;  $F_i$  – площа території об'єкта, де діє повітряна ударна хвиля з тиском  $\Delta P_{\phi,i}$ ;  $P_i$  – ймовірність ушкодження персоналу, що знаходиться в  $i$ -й зоні дії ударної хвилі вибуху (таблиця 4.16).

Таблиця 4.16 – Ймовірність ушкодження персоналу

$\Delta P_{\phi}$ , кПа	< 13	13–35	35–65	65–120	120–400	≥400
$P_i$	0	0,75	0,35	0,13	0,05	0

Площа  $F_i$  обчислюється шляхом почергового віднімання з площі зони ураження з тиском  $\Delta P_{\phi,i}$  площі зони ураження з тиском  $\Delta P_{\phi,i+1}$ .

*Загальні втрати людей* визначаються шляхом додавання кількості постраждалих у будівлях до кількості постраждалих поза будівлями:

$$N_{заг.} = N_{заг.б} + N_{заг.в}. \quad (4.66)$$

*Незворотні втрати людей* на об'єкті складуть

$$N_n = 0,6N_{заг.}, \quad (4.67)$$

а санітарні втрати

$$N_c = N_{зав.} - N_n. \quad (4.68)$$

Кількість постраждалих, що опинилися в завалах, визначається з виразу:

$$N_{зав} = N_{нов.р} + 0,3N_{сил.р}. \quad (4.69)$$

Радіуси зон теплового ураження людей, у разі горіння суміші в дефлаграційному режиму, можуть бути визначені з використанням наступних залежностей:

– отримання опіків III ступеня

$$R_0 = 80Q^{0,42}, \text{ м}, \quad (4.70)$$

– отримання опіків II ступеня

$$R_0 = 150Q^{0,42}, \text{ м}, \quad (4.71)$$

де  $Q$  – маса газу в суміші, т.

В останньому випадку втрати людей від руйнування будівель і дії повітряної ударної хвилі не розраховуються.

Число людей, що опинилися без даху, приймається рівним кількості людей, що проживають у будівлях, які отримали середні, сильні та повні руйнування.

Потреба в житловій площі в тимчасових будівлях, будиночках і палаткових городках може бути визначена з розрахунку розміщення: 3–4 особи (або 1 сім'я) в кімнаті збірно-розбірної будиночка, площею 8-10 м<sup>2</sup>; 4–5 осіб (або 1 сім'я) в одному табірному наметі; до 20 осіб у палатковому гуртожитку УСБ-56 і до 30 ліжок при використанні УСБ-56 для розгортання лікарень і медичних пунктів за умов двох'ярусного розміщення хворих.

Радіаційна і хімічна обстановка в районі аварії оцінюється за відповідними відомими методиками. При цьому враховується, що незахищені ємності з небезпечними хімічними речовинами можуть руйнуватися від повітряної ударної хвилі при тиску  $\Delta P_\phi = 70...75$  кПа.

При завчасній оцінці обстановки уздовж траси магістрального газопроводу виділяють, як правило, чотири смугові ділянки, що є паралельними газопроводу (з кожного боку). Ці смугові ділянки відповідають характерним зонам руйнувань: повних руйнувань ( $\Delta P_\phi \geq 50$  кПа); сильних руйнувань

( $30 \leq \Delta P_{\phi} < 50$  кПа); середніх руйнувань ( $20 \leq \Delta P_{\phi} < 30$  кПа); слабких руйнувань ( $10 \leq \Delta P_{\phi} < 20$  кПа).

Зони визначають за методикою, викладеною в п. 4.2.3, а потім наносять на схему уздовж траси газопроводу і визначають показники обстановки з використанням таблиць 4.11–4.15.

Необхідно відзначити, що показники аварійно-рятувальних робіт і життєзабезпечення населення використовуються при визначенні складу сил і засобів, що залучаються для ліквідації наслідків аварій.

### **4.3 Прогнозування об'ємів і термінів виконання інженерно-технічних заходів під час ліквідації наслідків аварій на атомних електричних станціях**

#### **4.3.1 Методика прогнозування об'ємів робіт з очищення території промислового майданчика атомної електричної станції від радіоактивно забруднених уламків і ґрунту**

Об'єм робіт з очищення території промислового майданчика на атомній електричній станції (АЕС) від радіоактивно забруднених уламків зруйнованої реакторної будівлі та елементів технологічного устаткування, а також від радіоактивно забруднених частинок, викинутих при вибуху реактора, залежать від типу реактора і будівельного об'єму будівлі.

За наявними даними у випадку сильного і повного руйнування промислових будівель у завал може потрапити від 40 до 100 м<sup>3</sup> на кожен тисячу кубометрів будівельного об'єму. При цьому об'єм високорадіоактивно забруднених уламків завалу, викинутих з реактора, може досягати 500–800 м<sup>3</sup>.

Значна частина уламків може бути розкидана на десятки метрів від будівлі й викликати сильне радіоактивне забруднення на всій території промайданчика станції.

Для зниження високого радіоактивного фону на території промислового майданчика АЕС і зниження небезпеки перенесення радіоактивних частинок із забруднених поверхонь за умов вітру необхідно провести різні інженерно-технічні заходи (ІТЗ), включаючи:

- очищення території АЕС від уламків будівельних конструкцій та технологічного устаткування;

- укладання асфальтових або бетонних екранів товщиною 15–20 см на ділянках території АЕС, віддалених на 20–30 м від стін зруйнованої реакторної будівлі (реакторного блоку). Рівні забруднення на цих ділянках достатньо високі й можуть підвищуватися внаслідок постійних викидів радіоактивних частинок зі зруйнованого реактора;

- зрізання шару забрудненого ґрунту завтовшки не менше 10 см з території промислового майданчика, який має трав'яний покрив або відкритий ґрунт, з подальшим просоченням спеціальними сполуками, що перешкоджають перенесенню радіоактивних частинок.

Враховуючи досвід ліквідації наслідків аварії на Чорнобильській АЕС, для очищення території промислового майданчика від радіоактивно забруднених уламків зруйнованої будівлі (завалу) використовувалися високо захищені землерийні машини типу ІМР (інженерна машина розгородження) з коефіцієнтом ослаблення радіації  $K_{осл} = 1000$  і більше разів. Ці машини можуть проводити розбирання і завантаження завалу в спеціальні контейнери без виходу оператора ІМР і водіїв контейнеровозів.

Продуктивність однієї ІМР ( $П_{ІМР}$ ) досягає 20–25 м<sup>3</sup>/год.

Час на розбирання завалу ( $T_{роз}$ ) може бути визначений за формулою:

$$T_{роз} = \frac{V_{зав}}{П_{ІМР} K_6 n}, \text{ год.}, \quad (4.72)$$

де  $V_{зав}$  – об'єм завалу, що підлягає розбиранню, м<sup>3</sup>;  $П_{ІМР}$  – продуктивність ІМР, м<sup>3</sup>/год.;  $K_6$  – коефіцієнт використання машини протягом часу.  $K_6$  може прийматися рівним 0,7–0,8;  $n$  – кількість ІМР, що беруть участь у розбиранні завалу.

Укладання бетонних (або асфальтових) екранів включає:

- зняття забрудненого шару ґрунту, завтовшки до 10 см;
- транспортування (підвезення) бетонної (асфальтової) суміші з бетонних заводів та її розрівнювання спеціальними (або стандартними) віброрейками, відвалом ІМР або бульдозера із захищеними кабінами з коефіцієнтом ослаблення  $K_{осл} = 800$ . Для підвезення бетонної суміші можуть використовуватися бетоновози типу «Міксер» з об'ємом міксера 4 м<sup>3</sup>, або самоскиди з об'ємом кузова від 2 до 3 м<sup>3</sup>.

Потрібна кількість бетону ( $V_{бет}$ ) може бути визначена за формулою:

$$V_{бет} = d n_{ш} S_6, \text{ м}^3, \quad (4.73)$$

де  $d$  – прийнята товщина одного шару бетонного екрана, м (може прийматися в межах 0,15–0,20 м, що забезпечує зниження ступеня опромінювання в 3–4 рази);  $S_6$  – площа бетонування території промайданчика, м<sup>2</sup>;  $n_{ш}$  – кількість шарів бетону, що укладається на ділянці.

Час укладання бетонних екранів залежить від об'єму бетону, який може бути підвезений до місця укладання. Досвід аварії на ЧАЕС показує, що один міксер може підвести від 4 до 8 м<sup>3</sup>/год. при дальності підвезення 10–15 км.

Конкретні значення часу укладання бетонного екрана можуть бути визначені за формулою:

$$T_{екр} = \frac{V_{бет}}{n_{мік} П_{мік} K_6}, \text{ год.}, \quad (4.74)$$

де  $V_{бет}$  – об'єм бетону, необхідного для укладання в екран, м<sup>3</sup>;  $П_{мік}$  – продуктивність міксера (самоскида) за умов підвозу бетону, м<sup>3</sup>/год. Може прий-

матися для міксера 4–8 м<sup>3</sup>/год., для самоскидів 4–7 м<sup>3</sup>/год.;  $K_g$  – коефіцієнт використання транспортних засобів,  $K_g = 0,6–0,8$ ;  $n_{\text{мік}}$  – кількість міксерів або самоскидів, шт.

При бетонуванні ділянок забрудненої радіоактивними частинками території промислового майданчика АЕС площею більше 30 м<sup>2</sup>, за технічними умовами на виробництво бетонних робіт, потрібне улаштування деформаційних швів. Тому після зняття верхнього шару ґрунту на бетонних ділянках встановлюються опалубні (застави) дошки, що створюють комірки 6х3 м або 6х6 м. На 1 м<sup>3</sup> бетону, що укладається, витрачається 5–6 досок завдовжки 6 м і шириною, рівною товщині шару бетону.

Зрізання поверхневого шару забрудненого ґрунту на території промислового майданчика АЕС може виконуватися відвалом ІМР або бульдозерів із захищеними кабінами ( $K_z$  не менше 800). Зрізаний ґрунт збирається у відвали, далі екскаватором із захищеною кабіною ( $K_z = 100–1000$  разів) завантажуються в контейнери, встановлені в кузові самоскида, і транспортується в могильник. З метою зменшення утворення пилу при зрізанні й завантаженні ґрунту проводиться поливання ґрунту водою з ємності, розташованої на кабіні екскаватора, а очищена площа покривається в'язкими матеріалами, здатними під час твердіння утворювати захисну плівку.

Об'єм ґрунту ( $V_{зр}$ ), що зрізається, залежить від розмірів площі, товщини шару, що зрізається, за один прохід ІМР або бульдозера і може бути визначений за формулою:

$$V_{зр} = dn_{ш}S \cdot \text{м}^3, \quad (4.75)$$

де  $d$  – товщина шару ґрунту, що зрізається за один прохід, м;  $S$  – площа забрудненої території промислового майданчика, на якій зрізається ґрунт, м<sup>2</sup>;  $n_{ш}$  – число шарів ґрунту, що зрізається. При використанні ІМР і бульдозерів товщина шару може досягати 10 см.

Продуктивність ІМР під час зрізання ґрунту на території промзони становить від 800 до 1200 м<sup>2</sup>/год.

Як в'язучі розчини, що наносяться на очищений від радіоактивно зараженого ґрунту майданчик, з метою утворення захищеної плівки, можуть використовуватися різні поверхнево активні речовини і, перш за все, відходи лісохімічної промисловості – сульфітно-спиртна барда, сульфітно-целюлозний луг, бітумні та сланцеві емульсії тощо.

Водні розчини цих речовин під час твердіння утворюють достатньо міцну плівку, що зберігається протягом 7–10 днів навіть у дощову погоду.

Розчини наносяться шляхом розбризкування спеціальними машинами. Кожна машина, при витраті розчину 1–1,5 л на 1 м<sup>2</sup> поверхні, може обробити від 4 до 5 тис. м<sup>2</sup> поверхні в годину при двох заправках розчином.



Для нанесення розчинів можуть використовуватися також машини міського комунального господарства з ємністю цистерни 6–10 тис. л. Продуктивність таких машин може досягати 10000 м<sup>2</sup>/год. і більше, в залежності від стану проїжджої частини та швидкості руху на ґрунтових ділянках.

Всі ці засоби повинні бути обладнані кабінами, захищеними від дії іонізуючих випромінювань.

#### **4.3.2 Поховання радіоактивно забруднених уламків та ґрунту в заглиблених могильниках**

Могильник для поховання радіоактивних уламків і ґрунту є котлованом, що відривається, як правило, в сухих ґрунтах, об'єм якого приймається рівним об'єму уламків, що підлягають похованню.

Ґрунт, що виймається під час відривання котловану, розрівнюється на місці, що дозволяє збільшити загальну глибину котловану і забезпечити необхідну товщину засипки після укладання в котлован радіоактивно забруднених уламків завалу і ґрунту. Товщина засипки, з урахуванням досвіду поховання уламків і ґрунту при аварії на ЧАЕС, повинна бути не менше 0,8–1,0 м; дно котловану повинно бути вище за рівень ґрунтових вод не менше, ніж на 1,5–2 м. В цьому випадку улаштування гідроізоляції може не передбачатися.

Могильники відриваються, як правило, на ділянках із рівнем ґрунтових вод більше 5–6 м. При цьому глибина котловану може бути близько 4 м. За вищих рівнів ґрунтових вод по дну котловану та понизу бічних і торцевих стінок влаштовується глиняна або бетонна гідроізоляція, товщиною шару не менше 10–15 см.

Заповнений уламками і ґрунтом котлован зверху закривається водонепроникною плівкою (толь, руберойд) та іншими гідроізоляційними матеріалами, після чого засипається ґрунтом. Гідроізоляційний шар зверху котловану запобігає можливості проникнення поверхневих вод і вимивання радіоактивних частинок.

Гідроізоляція по дну і низу стінок котловану, на висоту 0,5–1 м, дозволяє запобігти проникненню радіоактивних частинок у ґрунтові води при сезонних і непередбачених підвищеннях рівня ґрунтових вод.

Об'єм ґрунту під час відривання котловану для могильника повинен бути рівним об'єму радіоактивних матеріалів, що підлягають похованню. Розміри котловану у плані та за висотою при відомих  $V_{зр}$  і  $H$  можуть бути визначені за формулою:

$$V_{зр} = L_{сер} H \frac{B_в + B_н}{2}, \text{ м}^3, \quad (4.76)$$

де  $V_{зр}$  – об'єм радіоактивно забруднених уламків завалу і ґрунту, що підлягають похованню, м<sup>3</sup>;  $B_в$  і  $B_н$  – ширина котловану зверху і знизу, м;  $L_{сер}$  – середня довжина котловану,  $L_{сер} = \frac{L_в + L_н}{2}$ , м;  $H$  – глибина котловану.

У тих випадках, коли конкретний об'єм радіоактивно забруднених матеріалів є невідомим, розміри котловану по дну можуть прийматися: довжина – 30–50 м, ширина – 6–10 м. Під час закладання укосів 1:1 і за глибини котловану 3–4 м довжина котловану зверху може скласти 40–60 м, а ширина – 12–18 м. Об'єм такого котловану становитиме близько 3000 м<sup>3</sup>.

Відривання могильника включає: прокладку доріг; очищення майданчика від чагарників і рослинного ґрунту; пошарове зрізання і транспортування зрізаного ґрунту у відвал; розрівнювання ґрунту по бічних ділянках контуру котловану. Роботи з відривання, транспортування у відвал і розрівнювання виконуються ІМР або бульдозером, які, просуваючись уздовж довгої осі котловану, послідовно зрізають шари ґрунту завтовшки 10–15 см. Набраний перед відвалами ґрунт зрушується до місця відвала.

Між майданчиком для відвала ґрунту і верхньою кромкою апарелів у торцях котловану повинен залишатися вільний проїзд шириною 10–15 м для розвороту і з'їзду в котлован контейнеровозів і самоскидів із забрудненими уламками завалу і ґрунтом.

Час відкопування котловану могильника залежить від потужності й тягових характеристик ІМР і бульдозерів. Враховуючи досвід роботи ІМР і бульдозерів, продуктивність цих машин при відриванні котловану складала від 80 до 150 м<sup>3</sup> в годину.

Об'єм укладання гідроізоляції з пом'ятої глини або бетону завтовшки 10–15 см може бути визначений за формулою:

$$V_{зідр} = d_2 B_n L_n + 2d_2 h_2 (L_n + B_n), \text{ м}^3, \quad (4.74)$$

де  $d_2$  – товщина шару гідроізоляції (не менше 10–15 см), м;  $B_n$  – ширина котловану знизу, м;  $L_n$  – довжина котловану знизу, м;  $h_2$  – висота шару гідроізоляції на бічних стінках котловану ( $h_2 = 0,5–0,8$  м).

### **4.3.3 Водозахисні заходи на водостоках при аваріях на атомних електричних станціях**

Досвід ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС показав, що основними достатньо ефективними способами зниження небезпеки забруднення води в річках і каналах є:

– зведення захисних гребель у «стін в ґрунті» навколо забрудненої території АЕС, що запобігають потраплянню радіоактивних частинок у річки, водоймища і ґрунтові води;

– улаштування донних пасток у руслах крупних річок, що затримують поширення радіоактивних частинок, які потрапляють у воду річок;

– зведення фільтрувальних і глухих гребель на малих річках та каналах, що перешкоджають змиву радіоактивних частинок із площі водозбору річок і каналів у період дощів і в разі танення снігу.

Перші два способи зниження небезпеки забруднення ґрунтових і річкових вод проводяться за спеціальними планами з використанням спеціальної техніки і особливих технологій.

В ході ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС найбільш поширеним серед водозахисних заходів було зведення фільтрувальних і глухих гребель на малих річках і каналах.

З цією метою, в межах 30 км зони ЧАЕС, було проведено різні підготовчі заходи:

- визначено кількість річок, каналів, крупних ярів у небезпечній зоні;
- встановлено ширину і глибину річок в межень та в період повені, розміри та ухил берегів у заплаві річок і ярів, а також розміри площ водозбору для кожної річки, каналу, яру;
- проведено необхідні розрахунки за об'ємом стоку води від дощів і під час танення снігу за умов різної забезпеченості та встановлено значення висоти, довжини і ширини дамби.

Загальний об'єм ґрунту і фільтрувальних матеріалів, що укладаються в дамбу, може бути визначений за формулою:

$$V_d = \frac{1}{2} LH \left( A + \frac{2}{3} H \right) + \frac{1}{2} h_p b_p (A + 2H + h_p), \text{ м}^3, \quad (4.78)$$

де  $L$ ,  $H$  – довжина і висота дамби, м;  $h_p$ ,  $b_p$  – глибина і ширина річки в межень, м;  $A$  – ширина дамби по верху (приймається не менше 3 м у разі ущільнення ґрунту бульдозером).

Глухі дамби зводяться, як правило, з місцевого ґрунту шляхом відривання і переміщення його (або підвезення) скреперами з найближчих ділянок. Роботи можуть виконуватися скреперами, бульдозерами або екскаваторами.

Укоси зміцнюються каменем, бетонними плитами, дерном.

У фільтрувальних дамбах руслова частина їх відсипляється, як правило, з бутового каменю. На укосі, з боку притоки води (верхній б'єф), укладається фільтруючий матеріал – шар завтовшки не менше 1 м. Поверх цього шару відсипляється шар щебеню або гравію товщиною 0,5–1 м (залежно від висоти дамби).

Час на зведення глухих дамб може бути визначений залежно від типу і кількості землерийних машин.

В разі відривання ґрунту бульдозером поблизу дамби, або під час транспортування до 50 м, його продуктивність може скласти 100–200 м<sup>3</sup> в годину. За збільшення відстані транспортування ґрунту до 100 м продуктивність бульдозера під час укладання ґрунту в дамбу скорочується приблизно у два рази (50–100 м<sup>3</sup>/год.).

Скрепер як землерийно-транспортний засіб може бути раціонально використаний для розробки і транспортування ґрунту в насип на відстань до

1 км. При цьому продуктивність скрепера з ємністю ковша 6–10 м<sup>3</sup> складе від 50 до 100 м<sup>3</sup>/год.

#### **4.3.4 Прогнозування об'ємів і термінів виконання інженерно-технічних заходів щодо консервації радіоактивно забруднених ділянок лісу при аварії на атомній електричній станції**

Аналіз радіаційної обстановки у випадку аварії на ЧАЕС показав, що на ділянках лісу, які опинилися на шляху руху радіоактивної хмари, рівні радіоактивного забруднення в 1,5–2 рази більші, ніж на відкритій місцевості, і змінюються від 50 мР/год. до 1600 мР/год. Основною причиною цього є затримувальна здатність листя і особливо хвої, що мають велику поверхню зіткнення з радіоактивною хмарою.

Дія радіоактивних частинок стронцію–90 і цезію–137 на листя і хвою дерев викликає відмирання хвої та листя, а крони дерев стають джерелами вторинного забруднення за умов сильного вітру або в разі виникнення загорянь.

Відомі наступні основні способи консервації радіоактивно забруднених ділянок лісу:

1. Гідронамив ґрунту із «засипкою» спиляного лісу.
2. Спалювання у спеціальних печах деревини з тонким очищенням димового аерозолі.
3. Штучне (швидке) гниття деревини.
4. Засипка спиляних стовбурів і гілок сухим ґрунтом.

Дослідження і досвід консервації «рудого лісу» в зоні аварії на ЧАЕС показав, що найбільш раціональною є засипка спиляних дерев, гілок і підстилки сухим ґрунтом. При цьому виконувалися наступні групи заходів або види робіт:

1. Радіаційна розвідка і первинна підсипка сухого і чистого піску між деревами шаром 0,3–0,5 м, з метою зниження рівня радіоактивного фону в 5–7 разів і забезпечення безпеки роботи людей.
2. Спилювання дерев, очищення гілля та ущільнення завалу гусеницями ІМР і бульдозера.
3. Засипка ущільненого «завалу» шаром ґрунту завтовшки 0,5–0,7 м.
4. Підсипка на поверхні утвореного насипу рослинного ґрунту, посів трави або посадка чагарників.

Після виконання цих заходів рівень забруднення на поверхні утвореного насипу знижується більш ніж у 100 разів (1 метр ґрунту – 7 шарів половинного ослаблення, а  $2^7=128$  разів).

Перед початком робіт із консервації радіоактивно забруднених ділянок лісу проводиться обвалування їх насипом заввишки 1–1,5 м, з метою запобігання змиву радіоактивних частинок із дощовими і талими водами. Насип зводиться шляхом зрізання ґрунту з боку доріг, вільних ділянок і переміщення його у бік лісу. Для цього використовуються БАТ-М або ІМР із захищеними кабінами ( $K_3 = 80–100$ ). Продуктивність БАТ та ІМР під час виконання обвалування ділянок лісового масиву становить 100–120 м<sup>3</sup>/год.

Крім того, ділянка лісу розділяється протипожежними смугами шириною 3–5 м, очищеними від лісової підстилки і чагарнику до мінералізованого ґрунту. Постійно проводиться радіаційна розвідка (не менше 2 разів на добу). Відстань між протипожежними смугами приймається рівною 50–100 м. Розчищення смуг проводиться з використанням ІМР і БАТ із захищеними кабінами з  $K_3 = 80–100$ . Продуктивність ІМР і БАТ під час розчищення протипожежних смуг становить від 200 до 400 м/год.

Площа лісу, що підлягає консервації, розділяється на робочі ділянки наступних розмірів: ширина – 20 м, глибина – 50 м, площа – 1000 м<sup>2</sup>. На кожній такій ділянці розчищаються 2–3 тимчасових проїзди для проходження самоскидів із ґрунтом між крупними деревами. Ці підготовчі роботи виконуються ІМР і бульдозерами.

*Первинна підсипка чистого ґрунту* проводиться самоскидами, а розрівнювання ґрунту між деревами – бульдозером із захищеною кабіною, що має ступінь ослаблення випромінювань не менше ніж у 8–10 разів. Об'єм первинної підсипки ґрунту ( $V_{гр.н}$ ) на кожній робочій ділянці (1000 м<sup>2</sup>), в разі товщини підсипки 0,3–0,4 м, буде складати 300–400 м<sup>3</sup>.

Кількість самоскидів ( $N_c$ ), необхідних для виконання первинної підсипки ґрунту на робочій ділянці, може бути визначено за формулою:

$$N_c = \frac{V_{гр.н}}{n_p E_c K_6}, \text{ машино-годин,} \quad (4.79)$$

де  $V_{гр.н}$  – об'єм первинної засипки на робочій ділянці;  $E_c$  – ємність ґрунту, що перевозиться в самоскиді, м<sup>3</sup> (від 2 до 3 м<sup>3</sup>);  $n_p$  – кількість рейсів самоскида в годину. При дальності перевезення 5–7 км і вантаження одним екскаватором  $n_p$  може прийматися 2–4 рейси в годину;  $K_6$  – коефіцієнт використання робочого часу автомобіля,  $K_6 = 0,5$ .

Розрівнювання відсипаного самоскидами ґрунту між деревами проводиться бульдозером.

### *Задача 1*

Визначити необхідну кількість самоскидів ( $N_c$ ) з ємністю кузова 2–4 м<sup>3</sup> ( $E_c = 3$  м<sup>3</sup>) і кількістю рейсів у годину  $n_p = 3$  ( $K_6 = 0,5$ ) для первинної засипки робочої ділянки.  $V_{гр.н} = 300–400$  м<sup>3</sup>. Час безперервної роботи у зміну – 4 години.

*Розв'язок.*

За формулою 4.50:

$$\text{– при } V_{гр.н} = 300 \text{ м}^3 \quad N_c = \frac{300}{3 \cdot 3 \cdot 0,5} \approx 67 \text{ машино-годин;}$$

– при  $V_{зр.п}=400 \text{ м}^3$   $N_c = \frac{400}{3 \cdot 3 \cdot 0,5} \approx 88$  машино-годин.

Під час безперервної роботи особового складу протягом 4 годин, для виконання робіт із первинною підсіпання ґрунту на ділянці  $1000 \text{ м}^2$  буде потрібно не менше 17–22 самоскидів.

*Спилювання крупних і середніх дерев, очищення гілля і ущільнення «завалу»* проводиться з використанням мотопилок.

Об'єм деревини, що підлягає спилюванню і очищенню від гілля ( $V_{сп.л}$ ), залежить від густини лісового масиву, діаметра і довжини дерев:

$$V_{сп.л} = K_{кр}V_{1к} + K_{сер}V_{1сер}, \text{ м}^3/\text{га}, \quad (4.80)$$

де  $K_{кр}$  і  $K_{сер}$  – кількість крупних і середніх дерев на 1 га лісу. Дані показники залежать від ступеня густини лісового масиву і можуть братися за таблицею 4.17;  $V_{1к}$  і  $V_{1сер}$  – об'єм одного крупного і середнього дерева в  $\text{м}^3$ . Може братися за таблицею 4.17.

#### Задача 2

Визначити об'єм крупних і середніх дерев, що спилюються, на  $1000 \text{ м}^2$  лісового масиву середньої густини.

*Розв'язок.*

За таблицею 4.17 для середньої густини лісу:

$$K_{кр}=200 \text{ дер./га}; K_{сер}=340 \text{ дер./га}; V_{1к}=1,6 \text{ м}^3; V_{1сер}=0,9 \text{ м}^3.$$

$$V_{сп.л} = 200 \cdot 1,6 + 340 \cdot 0,9 = 626 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Робоча ділянка, яка дорівнює  $1000 \text{ м}^2$ , складає 0,1 га. Тоді об'єм лісу, що спилюється на робочій ділянці, буде складати  $626 \cdot 0,1 = 62,6 \text{ м}^3$ .

Таблиця 4.17 – Характеристики лісу

№ з/п	Кількість дерев на 1 га лісу			Характеристика дерев	Діаметр, см	Середня висота дерев, м	Об'єм одного дерева, $\text{м}^3$
	густого	середнього	рідкого				
1	320	200	130	великі	>32	20	1,6
2	520	340	300	середні	24-31	15	0,9
3	122	750	450	дрібні	12-23	5-15	0,75

Час, необхідний для спилування лісу, очищення гілля і ущільнення «завалу» залежить від продуктивності пил, їх кількості та ефективності використання. Цей час може бути визначений за формулою:

$$T_{сп.л} = \frac{V_{сп.л}}{P_n K_g}, \text{ год.}, \quad (4.81)$$

де  $V_{сп.л}$  – об'єм крупних і середніх дерев на 1 га лісу, м<sup>3</sup>;  $P_n$  – продуктивність пили (може прийматися 4–7,2 м<sup>3</sup>/год.);  $K_g$  – коефіцієнт використання пили ( $K_g = 0,5$ ).

### Задача 3

Визначити витрати часу на спилування крупних і середніх дерев на площі 1 га лісу середньої густини. Продуктивність пили – 7,2 м<sup>3</sup>/год. Об'єм лісу, що спилується, дорівнює 626 м<sup>3</sup>/га (задача 2).

*Розв'язок:*

$$T_{сп.л} = \frac{626}{7,2 \cdot 0,5} = 174 \text{ години роботи пили.}$$

Для робочої ділянки площею 1000 м<sup>2</sup> (0,1 га) час спилування однією пилою складе 174х0,1=17,4 машино-годин. При використанні 3 пил час спилування крупних і середніх дерев становитиме близько 6 годин, або двох змін, тривалістю 3 години кожна.

Засипка ущільненого «завалу» зі спиляних дерев і гілок чистим ґрунтом і підсипка рослинного шару здійснюватиметься за розглянутою раніше технологією первинної підстилки лісового масиву. Враховуючи, що об'єм ґрунту для засипання ущільненого лісового «завалу» приблизно в 2 рази більше, ніж у разі первинного підсіпання, необхідна кількість машино-змін роботи самокидів зросте також у 2 рази.

Необхідно відзначити, що під час виконання вищезазначених робіт особовий склад повинен мати каски з наплічниками, рукавиці, респіратори і захисні пелюстки, а також захисну споруду для короткочасного перебування вільного особового складу. На ЧАЕС для цього використовувався бронетранспортер-розвідник.

Досвід виконання інженерно-технічних заходів із консервації близько 20 га «Рудого лісу» при аварії на ЧАЕС показав, що чітка організація роботи комплексу сил і засобів дозволила провести консерваційні роботи за розглянутою вище технологією протягом 2,5 місяців. Результати радіаційної розвідки рівнів забруднення на поверхні законсервованого лісового масиву «Рудий ліс» показали, що рівень забруднення, який перевищував у ряді місць

1000 мР/год., знизився до 10–20 мР/год. і став близьким до фону навколишньої місцевості (15–20 мР/год.).

Розрахунки ефективності заходів щодо підсіпки ґрунту завтовшки 0,7-1,0 м над рівнем лісового завалу показали, що рівень радіації на поверхні ґрунту знижується більш ніж у 100 разів.

### **Контрольні питання та завдання**

1. Назвіть основні показники завалів.
2. Розкрийте основні передумови і сили, що враховуються при визначенні дальності розльоту уламків.
3. Вкажіть особливості, що враховуються при визначенні параметрів завалів у районах руйнівних землетрусів.
4. У чому полягає суть моделей дії при визначенні параметрів вибуху газоповітряних сумішей у відкритому просторі?
5. Назвіть розрахункові моделі, на основі яких отримано формули для визначення параметрів вибухів газоповітряних сумішей у виробничих приміщеннях.
6. Які особливості мають розрахункові моделі для визначення параметрів вибухів пилоповітряних сумішей у приміщеннях?
7. Розкрийте основні завдання, що вирішуються при прогнозуванні й оцінюванні хімічної обстановки.
8. Якими показниками визначається масштаб хімічного забруднення?
9. Чим характеризується тривалість хімічного забруднення?
10. Вкажіть основні показники, що визначаються при прогнозуванні та оцінці хімічної обстановки.
11. У чому полягає суть методики визначення зон дії ударної хвилі у разі аварійної розгерметизації магістрального газопроводу?
12. Назвіть основні показники, що характеризують інженерну обстановку при аваріях на пожежовибухонебезпечних об'єктах і розкрийте методичні підходи до їх визначення.
13. Які інженерно-технічні заходи можуть проводитися для зниження рівня радіації поблизу зруйнованого реактора і якими показниками вони характеризуються?
14. Якими засобами проводиться розбирання і транспортування ґрунту в могильники?
15. Наведіть основні вимоги до могильників.
16. Якими способами може бути забезпечене зниження небезпеки зараження води в річках, каналах і водоймищах?
17. У чому полягає відмінність між глухими і фільтрувальними дамбами?
18. Назвіть склад заходів щодо консервації лісових масивів, забруднених високо активними радіаційними частинками.
19. Перерахуйте склад робіт і засобів виконання заходів щодо засипки лісу, що спилюється, ґрунтом.



## ГЛАВА 5. ОСНОВИ ТЕОРІЇ НАДІЙНОСТІ. ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАДІЙНОСТІ НЕВІДНОВЛЮВАНИХ ОБ'ЄКТІВ

### 5.1 Основні поняття теорії надійності. Класифікація відмов. Складові надійності

Надійність із кожним роком стає найважливішою вимогою до інженерних систем, оскільки наше життя у великій мірі залежить від їх задовільного функціонування. Приклади таких систем – комп'ютери, поїзди, автомобілі, літаки, космічні супутники та ін.

Для великої кількості технічних систем розрахунок їх надійності є життєво необхідним етапом проектування, а не лише теоретичним способом «доказу» відповідності системи технічним вимогам або підтвердженням її високої якості. Для всіх, наприклад, є очевидною необхідність фактичного забезпечення високої надійності літака, космічного корабля, підвісної дороги тощо, оскільки кожен може оцінити кінцевий результат відмови цих систем. Але коли ціна надійності має менш наочну форму, то розрахунок характеристик безвідмовності перетворюється у деякий технічний ритуал, що не має жодного стосунку до кінцевої мети проектування – забезпечення необхідного рівня надійності відповідної системи. Так отримують право на життя, наприклад, транспортні засоби, які виходять з ладу в умовах оточуючого середовища, що відповідає робочому діапазону температур та ін. Це призводить до багатомільйонних втрат, яких можна було б уникнути за умов системного підходу до моделювання надійності технічних систем, коли даний етап належним чином планується і на нього виділяються відповідні кошти і час.

Слід зауважити, що проблема забезпечення безпечної та ефективної експлуатації складних технічних систем на сьогодні ще досить далека від свого вирішення. Про це свідчать тяжка аварія на II блоці АЕС ТШ (США) в березні 1979 р., витік отруйних газів на хімічному комбінаті у Бхопалі (Індія, 1984), вибух багаторазових космічних апаратів «Челленджер» (1986) і «Колумбія» (2003), руйнування 4-го блоку на Чорнобильській АЕС (1986) та ін. Людські жертви, радіоактивне зараження великих ділянок місцевості, величезні економічні втрати – ось характерні результати відмов складних технічних систем. При цьому необхідно враховувати моральні, психологічні та політичні аспекти ненадійності зазначених систем.

Очевидно, що термін «надійність» є тісно пов'язаним з терміном «ризик». Якщо розширити дослідження надійності складних технічних систем включенням до розгляду наслідків відмов вказаних систем, очікувану частоту їх появи, а також збитки (у т.ч. людські жертви), то можна вважати аналіз техногенного ризику виконаним. Разом з тим, завжди необхідно порівнювати отриману величину ризику зі ступенем ризику, що притаманний звичайним умовам життєдіяльності людини, з метою визначення прийняттого рівня ризику та формування підґрунтя для прийняття відповідних управлінських рішень.

### 5.1.1 Історичний огляд розвитку теорії надійності

У розвитку сучасної теорії надійності можна виділити три періоди. *Перший період* – *період становлення* (кінець 40-х – початок 60-х років ХХ століття) – характеризується оцінкою надійності за кількістю зафіксованих відмов. Розрахунок надійності проводився за інтенсивностями відмов елементів.

Слід відзначити, що в США в 40-х роках минулого століття основні зусилля по підвищенню надійності були зосереджені на поліпшенні якості. Різнорічні міри були спрямовані на збільшення довговічності машин: удосконалювання конструкцій, підвищення міцності матеріалів, чистоти обробки, поліпшення споживчих якостей вимірювальних приладів. Наприклад, фірма «Дженерал моторз» збільшила ресурс двигунів локомотивів у чотири рази за рахунок поліпшеної ізоляції та застосування вдосконалених підшипників.

В 50-ті роки міністерство оборони США оприлюднило інформацію про те, що річна вартість обслуговування озброєння становить 2\$ на 1\$ його вартості. Тобто за 10 років експлуатації озброєння вартістю 1 млн \$ буде потрібно 20 млн \$ на його утримання. Це показало доцільність заходів щодо підвищення надійності конструкцій ще на стадії проектування. У ці ж роки був покладений початок розробці методів кількісної оцінки «людського фактора» – оцінки внеску помилок людини в аварійність систем «людина – машина». Частота помилок людини, залежно від умов склала 0,01–0,02. Це дозволило надалі враховувати людські помилки під час проведення оцінок надійності.

Під час *другого періоду* – *періоду бурхливого розвитку теорії надійності* (60-ті роки ХХ століття) у зв'язку з розвитком космічної техніки – при оцінці надійності об'єктів стали враховувати вплив функціональних зв'язків між елементами системи, вплив режимів роботи (внутрішніх чинників) та факторів навколишнього середовища – температури, вологості, тиску, вібрацій, випромінювань і т.п. (зовнішніх факторів). У цей період розрахунки та оптимізація надійності об'єктів набули поширення у всіх галузях техніки. Багато питань надійності були стандартизовані. Велику увагу було приділено фізиці відмов. Також інтенсивно розвивалися математичні методи теорії надійності.

Із другої половини 70-х років ХХ століття спостерігається *зростання кількості досліджень, пов'язаних з вирішенням завдань прогнозування надійності об'єктів і оцінки надійності складних систем*. Цей третій період розробки теорії надійності характеризується подальшим поглибленим вивченням фізико-хімічних та статистичних закономірностей появи відмов як у простих, так і у складних системах.

Слід відзначити, що 70-ті роки минулого століття ознаменувалися інтенсивними роботами у сфері оцінок ризику для атомних електростанцій. Так, у 1977 році з'являється робота «WASH-1400. Аналіз безпеки реактора». Під керівництвом професора Н. Расмуссена група дослідників проаналізувала можливі аварії в атомній енергетиці, провела їх класифікацію залежно від імовірності появи та оцінила потенційні наслідки для населення. Використані в

цьому звіті дерева відмов, дерева подій та методи оцінки ризику стали застосовуватися в інших галузях промисловості.

Збільшення індустріальних небезпек для людини і навколишнього середовища, зростання, у зв'язку з цим, стурбованості населення призвели до прийняття в розвинених країнах ряду законів, що пропонують проведення досліджень джерел ризику перед початком будівництва підприємств.

На цей час досліджуються різні напрями в теорії та практиці надійності. При цьому велика увага приділяється вирішенню проблеми надійності у приладобудуванні, машинобудуванні, енергетиці та інших галузях техніки.

Математичним апаратом теорії надійності є теорія множин, теорія ймовірності, математична статистика, теорія випадкових процесів, теорія масового обслуговування, теорія інформації, математична логіка, теорія планування експерименту та інші математичні дисципліни.

### 5.1.2 Основні поняття теорії надійності

*Надійність* – це властивість об'єкта виконувати задані функції, зберігаючи протягом часу та у заданих межах значення встановлених експлуатаційних показників.

*Об'єкт* – технічний виріб певного цільового призначення, що розглядається в періоди проектування, виробництва, випробувань і експлуатації.

Об'єктами можуть бути різні системи та їх елементи.

*Елемент* – найпростіша складова частина виробу, у завданнях надійності може складатися з багатьох деталей.

*Система* – сукупність спільно діючих елементів, призначена для самостійного виконання заданих функцій.

Поняття елемента і системи трансформуються залежно від поставленого завдання. Наприклад, верстат, при встановленні його власної надійності, розглядається як система, що складається з окремих елементів – механізмів, деталей і т.п., а у процесі вивчення надійності технологічної лінії – як елемент.

Надійність об'єкта характеризується наступними основними *станами і подіями*.

*Справність* – стан об'єкта, при якому він відповідає всім вимогам, установленим нормативно-технічною документацією (НТД).

*Працездатність* – стан об'єкта, при якому він здатний виконувати задані функції, зберігаючи значення основних параметрів, установлених НТД.

Основні параметри характеризують функціонування об'єкта під час виконання поставлених завдань.

Поняття *справність* ширше, ніж поняття *працездатність*. Працездатний об'єкт зобов'язаний задовольняти лише тим вимогам НТД, виконання яких забезпечує нормальне застосування об'єкта за призначенням. Таким чином, якщо об'єкт є непрацездатним, то це свідчить про його несправність. З іншого боку, якщо об'єкт є несправний, те це не означає, що він є непрацездатним.

*Граничний стан* – стан об'єкта, при якому його застосування за призначенням неприпустимим або недоцільним.

Застосування (використання) об'єкта за призначенням припиняється в наступних випадках:

- в разі порушення безпеки;
- за умов неможливості усунення відхилень величин заданих параметрів;
- у випадку неприпустимого збільшення експлуатаційних витрат.

Для деяких об'єктів граничний стан є останнім у їх функціонуванні, тобто об'єкти знімаються з експлуатації; для інших – певною фазою в експлуатаційному графіку, що вимагає проведення ремонтно-відновлювальних робіт.

У зв'язку із цим об'єкти можуть класифікуватись наступним чином:

- *невідновлювані*, для яких працездатність у випадку виникнення відмови не підлягає відновленню;
- *відновлювані*, працездатність яких може бути відновлена, у тому числі і шляхом заміни.

До числа невідновлюваних об'єктів можна віднести, наприклад, підшипники кочення, напівпровідникові вироби, зубчасті колеса і т.п. Об'єкти, що складаються з багатьох елементів, наприклад, верстат, автомобіль, електронна апаратура, є відновлюваними, оскільки їхні відмови пов'язані з ушкодженнями одного або деяких елементів, які можуть бути замінені.

У ряді випадків той самий об'єкт, залежно від особливостей, етапів експлуатації або призначення, може вважатися відновлюваним або невідновлюваним.

*Відмова* – подія, що полягає у порушенні працездатного стану об'єкта.

*Критерій відмови* – ознака або сукупність ознак, згідно яких встановлюється факт виникнення відмови.

### **5.1.3 Класифікація і характеристики відмов**

За *типом* відмови підрозділяються на:

- *відмови функціонування* (виконання основних функцій об'єктом припиняється, наприклад, поломка зубів шестірні);
- *відмови параметричні* (деякі параметри об'єкта змінюються в неприпустимих межах, наприклад, втрата точності верстата).

За своєю *природою* відмови можуть бути:

- *випадковими*, тобто обумовленими непередбаченими перевантаженнями, дефектами матеріалу, помилками персоналу або збоями системи управління тощо;
- *систематичними*, тобто обумовленими закономірними та неминучими явищами, що викликають поступове нагромадження ушкоджень: утома, зношування, старіння, корозія тощо.

*Основні ознаки класифікації відмов:*

- характер виникнення;
- причина виникнення;
- характер усунення;
- наслідки відмов;
- подальше використання об'єкта;

- легкість виявлення;
- час виникнення.

Розглянемо кожну ознаку більш детально:

*характер виникнення:* – *раптова відмова* – відмова, що проявляється в різкій (миттєвій) зміні характеристик об'єкта;

– *поступова відмова* – відмова, що відбувається в результаті повільного, поступового погіршення якості об'єкта.

Раптові відмови, як правило, мають прояв у вигляді механічних ушкоджень елементів (тріщини, пробої ізоляції, обриви і т.п.) і не супроводжуються попередніми візуальними ознаками їхнього наближення. Раптова відмова характеризується незалежністю моменту настання від часу попередньої роботи.

Поступові відмови пов'язані зі зношуванням деталей і старінням матеріалів.

*причина виникнення:* – *конструкційна відмова*, викликана недоліками і невдалою конструкцією об'єкта;

– *виробнича відмова*, пов'язана з помилками у процесі виготовлення об'єкта через недосконалість або порушення технології;

– *експлуатаційна відмова*, викликана порушенням правил експлуатації.

*характер усунення:* – *стійка відмова*;

– *змінна відмова* (виникаюча/зникаюча).

*наслідки відмови:* – *легка відмова* (може бути легко усуненою);

– *середня відмова* (не викликає відмови суміжних вузлів – вторинні відмови);

– *важка відмова* (викликає вторинні відмови або призводить до загрози життю та здоров'ю людини).

*подальше використання об'єкта:* – *повні відмови*, що виключають можливість роботи об'єкта до їх усунення;

– *часткові відмови*, при яких об'єкт може частково використовуватися.

*легкість виявлення:* – *очевидні (явні) відмови*;

– *приховані (неявні) відмови*.

- час виникнення:*
- відмови, що виникають у початковий період експлуатації;
  - відмови під час нормальної експлуатації;
  - відмови, викликані незворотними процесами зношування деталей, старіння матеріалів та ін.

#### **5.1.4 Складові надійності**

Надійність є комплексною властивістю, що включає в себе, залежно від призначення об'єкта або умов його експлуатації, ряд простих властивостей:

- безвідмовність;
- довговічність;
- ремонтпридатність;
- збереженість (здатність до зберігання упродовж довгого періоду).

*Безвідмовність* – властивість об'єкта безупинно зберігати працездатність протягом деякого наробітку або протягом деякого часу.

*Наробіток* – тривалість або обсяг роботи об'єкта, що вимірюється в будь-яких неубуваючих величинах (одиниця часу, кількість циклів навантаження, кілометри пробігу тощо).

*Довговічність* – властивість об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану за умов встановленої системи технічного обслуговування і ремонтів.

*Ремонтпридатність* – властивість об'єкта, що полягає в його пристосованості до попередження та виявлення причин виникнення відмов, підтримці й відновленні працездатності шляхом проведення ремонтів та технічного обслуговування.

*Здатність зберігатися тривалий період* – властивість об'єкта безупинно зберігати необхідні експлуатаційні показники протягом (і після) строку зберігання та транспортування.

Залежно від об'єкта надійність може визначатися всіма перерахованими властивостями або частиною їх. Наприклад, надійність колеса зубчастої передачі, підшипників визначається їх довговічністю, а верстата – довговічністю, безвідмовністю та ремонтпридатністю.

#### **5.1.5 Основні показники надійності**

*Показник надійності* кількісно відображає, в якій мірі даному об'єкту властиві певні характеристики, що обумовлюють надійність. Одні показники надійності (наприклад, технічний ресурс, строк служби) можуть мати розмірність, ряд інших (наприклад, імовірність безвідмовної роботи, коефіцієнт готовності) є безрозмірними.

Розглянемо показники такої складової надійності, як *довговічність*.

*Технічний ресурс* – наробіток об'єкта від початку його експлуатації або поновлення експлуатації після ремонту до настання граничного стану. Інакше кажучи, технічний ресурс може бути регламентований у такий спосіб: до се-

реднього, капітального, від капітального до найближчого середнього ремонту і т.д. Якщо регламентація відсутня, то мається на увазі ресурс від початку експлуатації до досягнення граничного стану після всіх видів ремонтів.

Для невідновлюваних об'єктів поняття технічного ресурсу і наробітку до відмови збігаються.

*Призначений ресурс* – сумарний наробіток об'єкта, в разі досягнення якого експлуатація повинна бути припинена незалежно від його стану.

*Термін служби* – календарна тривалість експлуатації (у тому числі зберігання, ремонт і т.п.) від її початку до настання граничного стану.

На рис. 5.1 наведено графічну інтерпретацію зазначених показників, при цьому:

$t_0 = 0$  – початок експлуатації;

$t_1, t_5$  – моменти відключення з технологічних причин;

$t_2, t_4, t_6, t_8$  – моменти включення об'єкта;

$t_3, t_7$  – моменти виведення об'єкта в ремонт, відповідно, середній та капітальний;

$t_9$  – момент припинення експлуатації;

$t_{10}$  – момент відмови об'єкта.

Технічний ресурс (наробіток до відмови):

$$TP = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_{10} - t_8).$$

Призначений ресурс:

$$PP = t_1 + (t_3 - t_2) + (t_5 - t_4) + (t_7 - t_6) + (t_9 - t_8).$$

Термін служби об'єкта:

$$TC = t_{10}.$$



Рисунок 5.1 – Показники довговічності

## 5.1.6 Математичні основи теорії надійності

### 5.1.6.1 Основи теорії множин

Для позначення множин та їх елементів зазвичай використовують прописні (наприклад,  $X, Y, Z$ ) та строкові (наприклад,  $c, d, e$ ) букви.

Якщо  $k$  – елемент множини  $B$ , то зазначений факт відображається наступним чином:  $k \in B$ , а його заперечення –  $k \notin B$ . Якщо  $X$  є підмножиною

множини  $Y$ , то це можна представити так:  $X \subset Y$  або  $Y \supset X$ . Заперечення даної операції можна записати як  $X \not\subset Y$ .

Якщо дві множини є рівними (кожна множина належить іншій), то значена умова записується у вигляді  $X = Y$ . Подане співвідношення є справедливим тільки у тому випадку, коли  $X \subset Y$  та  $Y \subset X$ .

Об'єднання множин позначається символом «+» або  $\cup$ . Наприклад, якщо  $X + Y = Z$ , то це означає, що всі елементи множини  $X$  або  $Y$  чи обох множин  $X$  та  $Y$  містяться у множині  $Z$ . Вираз  $Z = X + Y$  можна записати також у вигляді  $Z = X \cup Y$  (рис. 5.2).

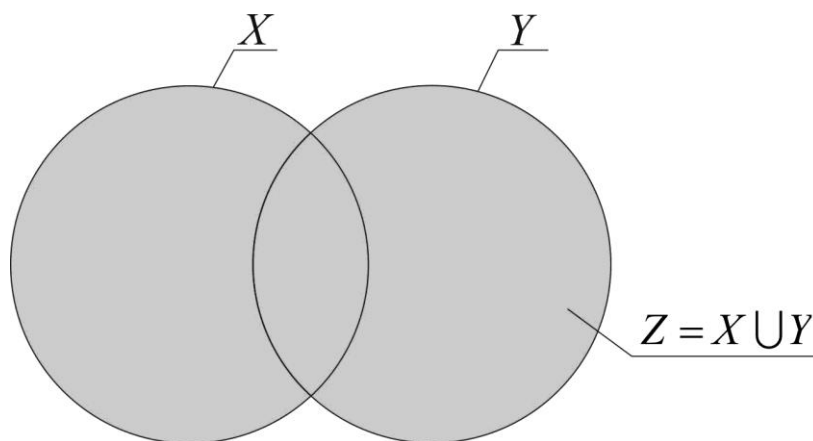


Рисунок 5.2 – Об'єднання множин

Перетин множин позначається символом  $\cap$  або точкою ( $\bullet$ ). Наприклад, якщо перетин двох множин (або подій)  $C$  та  $D$  представлений третьою множиною  $T$  (рис. 5.3), то дана множина містить всі елементи, що належать як  $C$ , так і  $D$ , і позначається як  $T = C \cap D$  або  $T = C \bullet D$ .

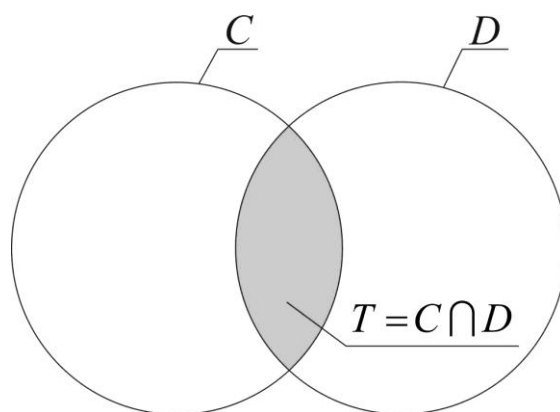


Рисунок 5.3 – Перетин множин

Якщо перетин множин  $C$  і  $D$  не містить елементів (є порожнім), то такі множини називаються *несумісними* (рис. 5.4).



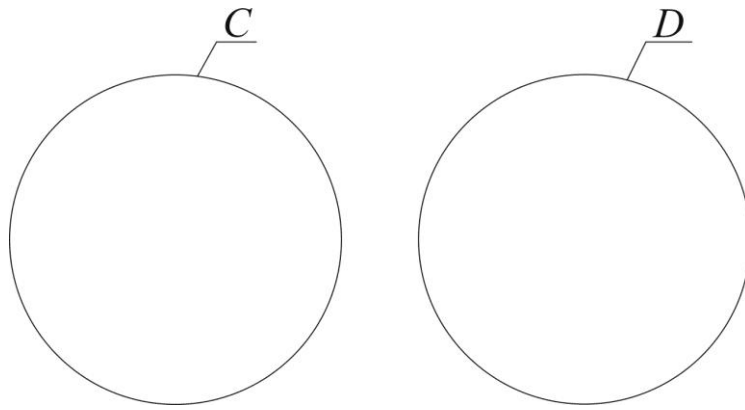


Рисунок 5.4 – Несумісні множини

Основні закони булевої алгебри:

1. Розподільчий закон

$$X \bullet (Y + Z) = (X \bullet Y) + (X \bullet Z),$$

$$X + (Y \bullet Z) = (X + Y) \bullet (X + Z).$$

2. Булеві тотожності

$$X + X = X,$$

$$X \bullet X = X.$$

3. Закони поглинання

$$X + (X \bullet Y) = X,$$

$$X \bullet (X + Y) = (X \bullet Y).$$

### 5.1.6.2 Основи теорії ймовірностей

Теорію ймовірностей можна визначити як дисципліну, що вивчає події, появи яких є випадковими. Найбільш важливими властивостями появи подій є наступні:

1. Для кожної події  $X$  ймовірність її появи дорівнює

$$0 \leq P(X) \leq 1.$$

2. У випадку несумісних подій  $x_1, x_2, \dots, x_n$  ймовірність об'єднання (суми) подій має наступний вигляд:

$$P(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = P(x_1) + P(x_2) + \dots + P(x_n).$$

3. Для суми  $n$  подій отримаємо наступний вираз:

$$P(x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \{P(x_1) + P(x_2) + \dots + P(x_n)\} - \\ - \{P(x_1x_2) + P(x_1x_3) + \dots + P(x_{n-1}x_n)\} + \dots + (-1)^{n-1} P(x_1x_2 \dots x_n).$$

Наприклад, у випадку двох статистично незалежних подій  $x_1$  і  $x_2$  вираз для ймовірності набуває вигляду:

$$P(x_1 + x_2) = P(x_1) + P(x_2) - P(x_1x_2).$$

4. Ймовірність настання подій деякого вибіркового простору  $S$  завжди дорівнює 1, тобто  $P(S) = 1$ . Таким чином, ймовірність заперечення вибіркового простору  $\bar{S}$  дорівнює  $P(\bar{S}) = 0$ .

5. Вираз для ймовірності перетину  $n$  подій має наступний вигляд:

$$P(x_1x_2 \dots x_n) = P(x_1)P(x_2|x_1) \dots P(x_n|x_1x_2 \dots x_{n-1}),$$

де  $P(x_2|x_1)$  означає ймовірність появи події  $x_2$  за умови, що сталася подія  $x_1$ .

Якщо всі події є статистично незалежними, то вищенаведений вираз набуває вигляду:

$$P(x_1x_2 \dots x_n) = P(x_1)P(x_2) \dots P(x_n).$$

6. Події  $X$  та  $Y$  є незалежними тільки тоді, коли виконується наступна умова:

$$P(XY) = P(X)P(Y).$$

Якщо події  $X$  та  $Y$  не задовольняють даній умові, то зазначені події є *залежними*.

Умовна ймовірність появи події  $x_n$  за умов настання подій  $x_1, x_2, \dots, x_{n-1}$  може бути знайденою за допомогою виразу:

$$P(x_n|x_1x_2 \dots x_{n-1}) = \frac{P(x_1x_2 \dots x_n)}{P(x_1x_2 \dots x_{n-1})}.$$

## 5.2 Показники надійності невідновлюваних об'єктів

Найбільш важливими показниками надійності невідновлюваних об'єктів є *показники безвідмовності*, до яких відносяться:

- *ймовірність безвідмовної роботи*;
- *щільність розподілу відмов*;
- *інтенсивність відмов*;
- *середній наробіток до відмови*.

Показники надійності представляються у двох формах (визначеннях):

- статистична (вибіркові оцінки);
- ймовірнісна.

*Статистичні визначення (вибіркові оцінки)* показників одержують за результатами випробувань на надійність.

Припустімо, що в ході випробувань деякої кількості однотипних об'єктів отримано кінцеве значення параметра – наробітку до відмови. Отримані числа являють собою вибірку із загальної «генеральної сукупності», що має необмежений об'єм даних про наробіток до відмови об'єкта. Кількісні показники, що характерні для «генеральної сукупності», є *істинними (ймовірнісними) показниками*, оскільки об'єктивно характеризують випадкову величину – наробіток до відмови.

Показники, що визначені для вибірки  $i$ , при цьому, дозволяють зробити певні висновки про випадкову величину, є *вибірковими (статистичними) оцінками*. Очевидно, що в разі досить великої кількості випробувань (великої вибірки) оцінки *наближаються* до ймовірнісних показників.

Ймовірнісна форма подання показників є зручною при аналітичних розрахунках, а статистична – у випадку експериментального дослідження надійності.

Для позначення статистичних оцінок будемо використовувати знак \*.

Прийнемо наступну *схему випробувань* для оцінки надійності.

Нехай на випробування поставлено  $N$  однакових серійних об'єктів. Умови випробувань є ідентичними, а випробування кожного з об'єктів проводяться до його відмови.

Введемо наступні позначення:

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$  – випадкова величина наробітку об'єкта до відмови;

$N(t)$  – кількість об'єктів, працездатних до моменту наробітку  $t$ ;

$n(t)$  – кількість об'єктів, що відмовили до моменту наробітку  $t$ ;

$\Delta n(t, t + \Delta t)$  – кількість об'єктів, що відмовили в інтервалі наробітку  $[t, t + \Delta t]$ ;

$\Delta t$  – тривалість інтервалу наробітку.

### 5.2.1 Ймовірність безвідмовної роботи

Статистична оцінка ймовірності безвідмовної роботи (емпірична функція надійності) визначається наступним чином:

$$P^*(t) = \frac{N(t)}{N}, \quad (5.1)$$

тобто відношенням кількості  $N(t)$  об'єктів, що безвідмовно пропрацювали до моменту наробітку  $t$ , до кількості об'єктів, які були справними до початку випробувань ( $t=0$ ), – до загальної кількості об'єктів  $N$ . Оцінку ймовірності безвідмовної роботи можна розглядати як показник частки працездатних об'єктів до моменту наробітку  $t$ .

Оскільки  $N(t) = N - n(t)$ , то ймовірність безвідмовної роботи може бути також визначена за наступною формулою:

$$P^*(t) = 1 - \frac{n(t)}{N} = 1 - Q^*(t), \quad (5.2)$$

де  $Q^*(t) = \frac{n(t)}{N}$  – статистична оцінка ймовірності відмови.

У статистичному визначенні оцінка ймовірності відмови являє собою емпіричну функцію розподілу відмов.

У зв'язку з тим, що події, які полягають у настанні або ненастанні відмови до моменту наробітку  $t$ , є протилежними, то

$$P^*(t) + Q^*(t) = 1. \quad (5.3)$$

Неважко переконатися, що ймовірність безвідмовної роботи є убуваючою, а ймовірність відмови – зростаючою функцією наробітку. Дійсно, на момент початку випробувань ( $t=0$ ) кількість працездатних об'єктів дорівнює загальному їх числу  $N(t) = N(0) = N$ , а кількість об'єктів, що відмовили, –  $n(t) = n(0) = 0$ . Таким чином,  $P^*(t) = P^*(0) = 1$ , а  $Q^*(t) = Q^*(0) = 0$ .

При наробітку  $t \rightarrow \infty$  всі об'єкти, що поставлені на випробування, відмовлять, тобто  $N(\infty) = 0$ , а  $n(\infty) = N$ , тобто  $P^*(t) = P^*(\infty) = 0$ , а  $Q^*(t) = Q^*(\infty) = 1$ .

*Ймовірнісне визначення ймовірності безвідмовної роботи:*

$$P(t) = P\{T \geq t\}. \quad (5.4)$$

Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи являє собою ймовірність того, що випадкова величина наробітку до відмови  $T$  виявиться не менше деякого заданого наробітку  $t$ .

Очевидно, що ймовірність відмови буде функцією розподілу випадкової величини  $T$  і являє собою ймовірність того, що наробіток до відмови виявиться менше деякого заданого наробітку  $t$ :

$$Q(t) = P\{T < t\}. \quad (5.5)$$

Графіки для ймовірності безвідмовної роботи та ймовірності відмови наведені на рис. 5.5.

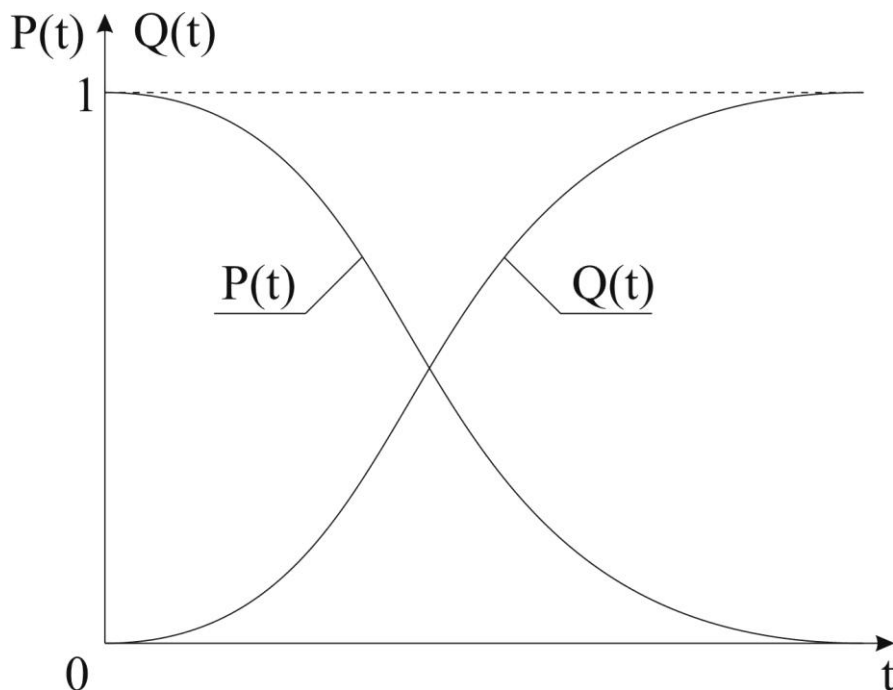


Рисунок 5.5 – Графічна інтерпретація  $P(t)$  і  $Q(t)$

Зі зростанням кількості  $N$  (збільшенням вибірки) досліджуваних об'єктів  $P^*(t)$  і  $Q^*(t)$  сходяться за ймовірністю (наближаються за значеннями) до  $P(t)$  і  $Q(t)$ .

Збіжність за ймовірністю може бути представленою в такий спосіб:

$$P\left\{\lim_{N \rightarrow \infty} |P^*(t) - P(t)| = 0\right\} = 1. \quad (5.6)$$

Практичний інтерес викликає визначення ймовірності безвідмовної роботи в інтервалі наробітку  $[t, t + \Delta t]$  за умови, що об'єкт безвідмовно про-

працював до початку інтервалу  $t$ . Визначимо цю ймовірність, використовуючи теорему множення ймовірностей і виділивши наступні події:

$A$  – безвідмовна робота об'єкта до моменту  $t$ ;

$B$  – безвідмовна робота об'єкта в інтервалі  $\Delta t$ ;

$C = A \cdot B$  – безвідмовна робота об'єкта до моменту  $t + \Delta t$ .

Очевидно, що  $P(C) = P(A \cdot B) = P(A) \cdot P(B|A)$ , оскільки події  $A$  і  $B$  будуть залежними.

Умовна ймовірність  $P(B|A)$  являє собою ймовірність безвідмовної роботи  $P(t, t + \Delta t)$  в інтервалі  $[t, t + \Delta t]$ . Таким чином:

$$P(B|A) = P(t, t + \Delta t) = \frac{P(C)}{P(A)} = \frac{P(t + \Delta t)}{P(t)}. \quad (5.7)$$

Ймовірність відмови в інтервалі наробітку  $[t, t + \Delta t]$ , з урахуванням (5.7), дорівнює:

$$Q(t, t + \Delta t) = 1 - P(t, t + \Delta t) = \frac{P(t) - P(t + \Delta t)}{P(t)}. \quad (5.8)$$

### 5.2.2 Щільність розподілу відмов

Статистична оцінка щільності розподілу відмов визначається відношенням кількості об'єктів  $\Delta n(t, t + \Delta t)$ , що відмовили в інтервалі наробітку  $[t, t + \Delta t]$ , до добутку загальної кількості об'єктів  $N$  і тривалості інтервалу наробітку  $\Delta t$ :

$$f^*(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} \left[ \text{од. наробітку}^{-1} \right]. \quad (5.9)$$

Оскільки  $\Delta n(t, t + \Delta t) = n(t + \Delta t) - n(t)$ , де  $n(t + \Delta t)$  – кількість об'єктів, що відмовили до моменту наробітку  $(t + \Delta t)$ , то оцінку щільності розподілу відмов можна представити:

$$f^*(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \left[ Q^*(t + \Delta t) - Q^*(t) \right] = \frac{Q^*(t, t + \Delta t)}{\Delta t}, \quad (5.10)$$

де  $Q^*(t, t + \Delta t)$  – оцінка ймовірності відмови в інтервалі наробітку, тобто збільшення ймовірності відмови за  $\Delta t$ .

Оцінка щільності розподілу відмов являє собою «частоту» відмов, тобто кількість відмов за одиницю наробітку, віднесена до початкової кількості об'єктів.

Ймовірнісне визначення щільності розподілу відмов впливає з (5.10) в разі наближення інтервалу наробітку  $\Delta t \rightarrow 0$  і збільшення об'єму вибірки  $N \rightarrow \infty$ :

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q^*(t, t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{d[1 - P(t)]}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (5.11)$$

Щільність розподілу відмов, по суті, є щільністю розподілу (щільністю ймовірності) випадкової величини  $T$  наробітку об'єкта до відмови.

Оскільки  $Q(t)$  є неубуваючою функцією свого аргументу, то  $f(t) \geq 0$ .

Один із можливих видів графіка  $f(t)$  наведений на рис. 5.6.

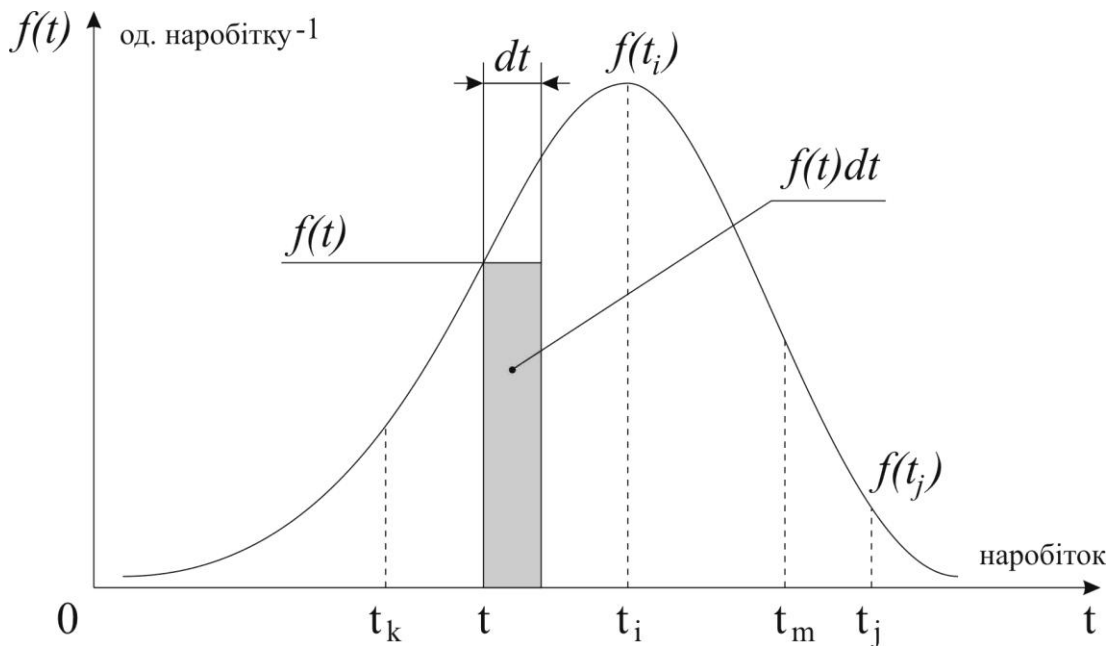


Рисунок 5.6 – Графік щільності розподілу відмов

Як видно з даного рисунка, щільність розподілу відмов  $f(t)$  характеризує частоту відмов (або приведену ймовірність відмов), з якої розподіляються конкретні значення наробітків всіх  $N$  об'єктів  $(t_1, t_2, \dots, t_N)$ , що складають випадкову величину наробітку  $T$  до відмови об'єкта даного типу.

Припустімо, у результаті випробувань встановлено, що значення наробітку  $t_i$  є властивим найбільшій кількості об'єктів. Про це свідчить максимальна величина  $f(t_i)$ . І навпаки, найбільший наробіток  $t_j$  було зафіксовано тільки в декількох об'єктах, тому й частота  $f(t_j)$  появи такого наробітку на загальному фоні буде малою.

Відкладемо по осі абсцис деякий наробіток  $t$  і нескінченно малий інтервал наробітку шириною  $dt$ , що примикає до  $t$ . Тоді ймовірність потрапляння випадкової величини наробітку  $T$  на елементарну ділянку шириною  $dt$  (з точністю до нескінченно малих вищого порядку) дорівнює:

$$P\{T \in (t, t + dt)\} = P\{t < T < t + dt\} \approx f(t)dt, \quad (5.12)$$

де  $f(t)dt$  – елемент ймовірності відмови об'єкта в інтервалі  $[t, t + \Delta t]$  (геометрично – це площа прямокутника, що опирається на відрізок  $dt$ ).

Аналогічно ймовірність потрапляння наробітку  $T$  в інтервал  $[t_k, t_m]$  дорівнює:

$$P\{T \in [t_k, t_m]\} \approx \sum_{t_i \in [t_k, t_m]} f(t_i)dt_i = \int_{t_k}^{t_m} f(t)dt, \quad (5.13)$$

що геометрично інтерпретується площею під кривою  $f(t)$ , яка опирається на ділянку  $[t_k, t_m]$ .

Ймовірність відмови та ймовірність безвідмовної роботи можна виразити за допомогою функції щільності розподілу відмов.

Оскільки  $Q(t) = P\{T < t\}$ , то, використовуючи вираз (5.13), одержимо:

$$Q(t) = P\{0 < T < t\} = \int_0^t f(t)dt. \quad (5.14)$$

Розширення інтервалу ліворуч лише до нуля обумовлено тим, що  $T$  не може бути негативним.

Через те, що  $P(t) = P\{T \geq t\}$ , одержимо:

$$P(t) = P\{t \leq T < \infty\} = \int_t^{\infty} f(t)dt. \quad (5.15)$$

Очевидно, що  $Q(t)$  являє собою площу під кривою  $f(t)$  ліворуч від  $t$ , а  $P(t)$  – площу під  $f(t)$  праворуч від  $t$ . Оскільки всі отримані у процесі випробувань значення наробітків лежать під кривою  $f(t)$ , то:

$$\int_0^{\infty} f(t)dt = \int_0^t f(t)dt + \int_t^{\infty} f(t)dt = Q(t) + P(t) = 1. \quad (5.16)$$

### 5.2.3 Інтенсивність відмов

Статистична оцінка інтенсивності відмов визначається наступним чином:

$$\lambda^*(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \left[ \text{од. наробітку}^{-1} \right], \quad (5.17)$$



тобто відношенням кількості об'єктів  $\Delta n(t, t + \Delta t)$ , що відмовили в інтервалі наробітку  $[t, t + \Delta t]$ , до добутку кількості  $N(t)$  працездатних об'єктів на момент  $t$  і тривалості інтервалу наробітку  $\Delta t$ .

Порівнюючи (5.9) і (5.17), можна відзначити, що *інтенсивність відмов децю повніше характеризує надійність об'єкта на момент наробітку  $t$* , оскільки показує частоту відмов, віднесену до фактично працездатного числа об'єктів на момент наробітку  $t$ .

Ймовірніше визначення інтенсивності відмов одержимо, помноживши та поділивши праву частину виразу (5.17) на  $N$ :

$$\lambda^*(t) = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N(t) \cdot \Delta t} \cdot \frac{N}{N} = \frac{\Delta n(t, t + \Delta t)}{N \cdot \Delta t} \cdot \frac{N}{N(t)}.$$

З урахуванням (5.10), оцінку інтенсивності відмов  $\lambda^*(t)$  можна представити:

$$\lambda^*(t) = \frac{Q^*(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P^*(t)},$$

звідки, при наближенні  $\Delta t \rightarrow 0$  і  $N \rightarrow \infty$ , одержуємо:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Q^*(t, t + \Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{P^*(t)} = \frac{dQ(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P(t)} = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (5.18)$$

Можливі види інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  для різних об'єктів наведені на рис. 5.7.

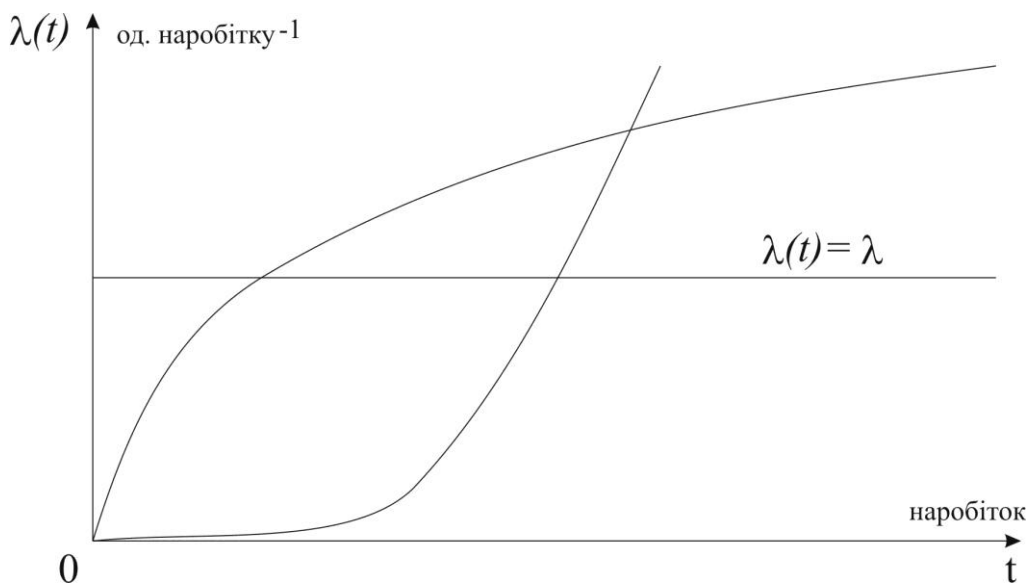


Рисунок 5.7 – Графік інтенсивності відмов

### 5.3 Рівняння зв'язку показників надійності.

#### Чисельні характеристики безвідмовності невідновлюваних об'єктів

##### 5.3.1 Рівняння зв'язку показників надійності

У п. 5.2 наведено вирази, що визначають зв'язок імовірності безвідмовної роботи (ймовірності відмови) з функцією щільності розподілу відмов  $f(t)$ . Оскільки інтенсивність відмов  $\lambda(t)$  є більш повною характеристикою надійності, то існує необхідність отримання зв'язку ймовірності безвідмовної роботи  $P(t)$  з інтенсивністю відмов.

Використовуючи вираз для інтенсивності відмов

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

та вираз (5.11) запишемо:

$$\frac{dP(t)}{dt} = -\lambda(t)P(t).$$

Розділяючи змінні, одержимо:

$$\frac{dP(t)}{P(t)} = -\lambda(t)dt.$$

Інтегруючи від 0 до  $t$  і звертаючи увагу, що при  $t = 0$  ймовірність безвідмовної роботи об'єкта  $P(0) = 1$ , одержуємо:

$$\int_0^t \frac{dP(t)}{P(t)} = \ln P(t) \Big|_0^t = \ln P(t) = -\int_0^t \lambda(t)dt.$$

Таким чином, рівняння зв'язку основних показників надійності має вигляд:

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \quad (5.19)$$

Величина  $\lambda(t)dt$  являє собою ймовірність того, що елемент, який безвідмовно проробив в інтервалі наробітку  $[0, t]$ , відмовить в інтервалі  $[t, t + dt]$ .

Рівняння зв'язку (5.19) показує, що всі показники надійності  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $f(t)$  і  $\lambda(t)$  є рівноправними в тому розумінні, що, знаючи один з них, можна визначити інші.

### 5.3.2 Чисельні характеристики безвідмовності невідновлюваних об'єктів

*Середній наробіток до відмови*

Розглянуті вище функціональні показники надійності  $P(t)$ ,  $Q(t)$ ,  $f(t)$  і  $\lambda(t)$  повністю описують випадкову величину наробітку до відмови  $T$ . У той же час, для розв'язання низки практичних задач надійності інколи достатньо знати деякі числові характеристики цієї випадкової величини. У першу чергу – *середній наробіток до відмови*.

*Статистична оцінка* середнього наробітку до відмови має наступний вигляд:

$$T_0^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad (5.20)$$

де  $t_i$  – наробіток до відмови  $i$ -го об'єкта.

При *ймовірнісному визначенні* середній наробіток до відмови являє собою *математичне очікування* випадкової величини  $T$  і визначається так:

$$T_0 = M \{T\} = \int_0^{\infty} t f(t) dt. \quad (5.21)$$

Використовуючи вираз для щільності розподілу відмов

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt},$$

можна перетворити (5.21) до виду:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (5.22)$$

з урахуванням того, що  $P(0) = 1$ ,  $P(\infty) = 0$ .

З виразу (6.22) випливає, що середній наробіток до відмови геометрично інтерпретується як площа під кривою  $P(t)$  (рис. 5.8).

Очевидно, що зі збільшенням вибірки випробувань  $N \rightarrow \infty$  середній арифметичний наробіток (оцінка  $T_0^*$ ) сходиться за ймовірністю до математичного очікування наробітку до відмови.

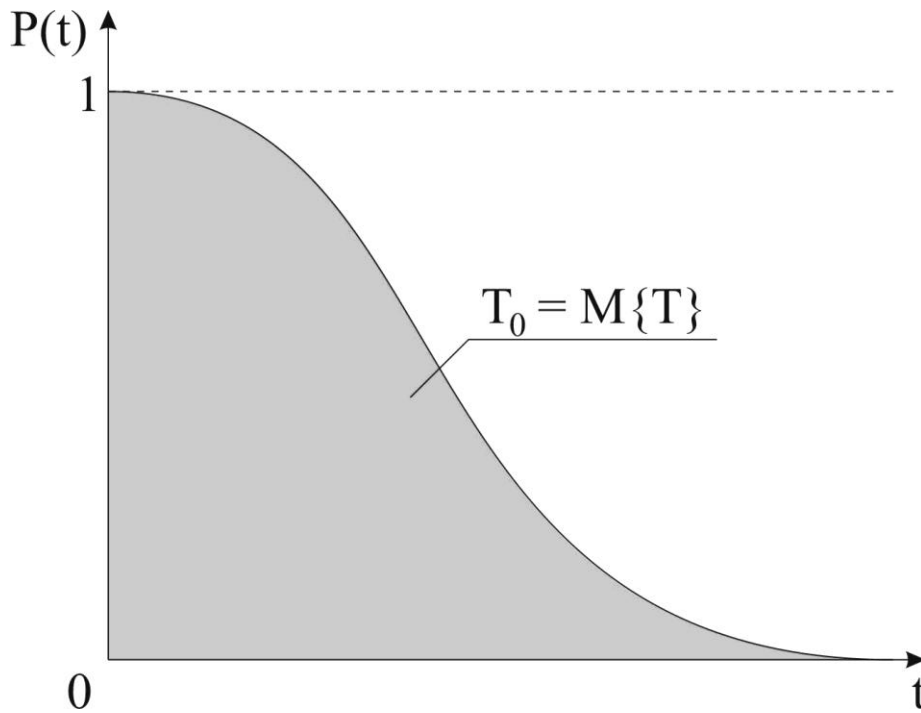


Рисунок 5.8 – Геометрична інтерпретація середнього наробітку до відмови

Математичне очікування наробітку  $T_0$  означає математично очікуваний наробіток до відмови однотипних елементів, тобто усереднений наробіток до першої відмови.

На практиці також викликають інтерес умовні середні наробітки:

1) середній корисний наробіток ( $T_0|_{t \leq t_1}$ ) визначається за умови, що при досягненні наробітку  $t_1$  всі об'єкти, які залишилися працездатними, знімаються з експлуатації;

2) середня тривалість майбутньої роботи ( $T_0|_{t > t_1}$ ) за умови, що об'єкт безвідмовно працював в інтервалі  $(0, t_1)$ .

Причини використання даних показників:

1. Високонадійні об'єкти (елементи електронних схем), як правило, експлуатуються менший строк, ніж  $T_0$  ( $t_e < T_0$ ), тобто замінюються через моральне старіння раніше, ніж встигають напрацювати  $T_0$ .

2. Часто для зазначених об'єктів скорочують період випробувань (проводять до наробітків, що відповідають їх моральному старінню), тому  $T_0$  у такому випадку розуміють як середній наробіток, що мав би місце в дійсності, якби інтенсивність відмов залишалася такою, якою вона була в початковий період випробувань.

Середній корисний наробіток  $T_0|_{t \leq t_1}$  (за аналогією з  $T_0$ ):

$$T_0 \Big|_{t \leq t_1} = \int_0^{t_1} P(t) dt .$$

Середня тривалість майбутньої роботи  $T_0 \Big|_{t > t_1}$  :

$$T_0 \Big|_{t > t_1} = M \{T - t_1\} = \frac{1}{P(t_1)} \int_{t_1}^{\infty} P(t) dt .$$

Співвідношення між  $T_0 \Big|_{t \leq t_1}$ ,  $T_0 \Big|_{t > t_1}$  і  $T_0$  :

$$T_0 \Big|_{t \leq t_1} + T_0 \Big|_{t > t_1} \cdot P(t_1) = T_0 .$$

Графічна інтерпретація  $T_0 \Big|_{t \leq t_1}$  і  $T_0 \Big|_{t > t_1}$  наведена на рис. 5.9.

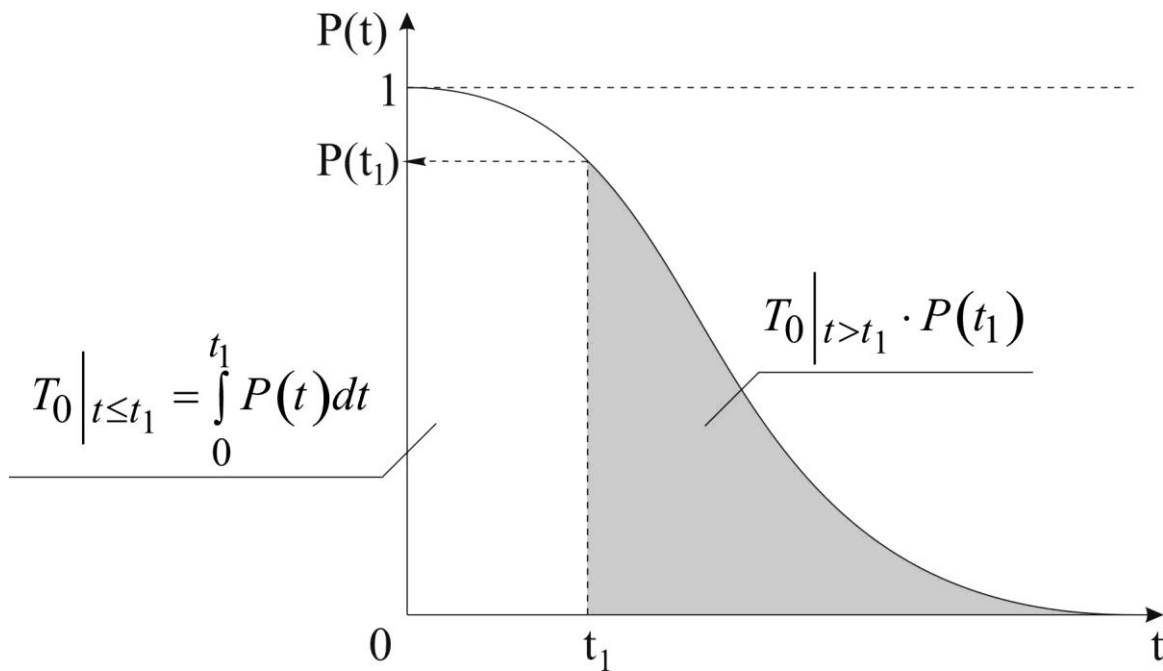


Рисунок 5.9 – Умовні середні наробітки

У той же час середній наробіток не може повністю характеризувати безвідмовність об'єкта. Так, за однакових середніх наробітків до відмов  $T_0$  надійність об'єктів 1 і 2 може досить істотно розрізнятися (рис. 5.10). Очевидно, що більше розсіювання наробітку до відмови (крива щільності розподілу відмов  $f_2(t)$  нижче та ширше) свідчить про меншу надійність об'єкта 2, у порівнянні з об'єктом 1.

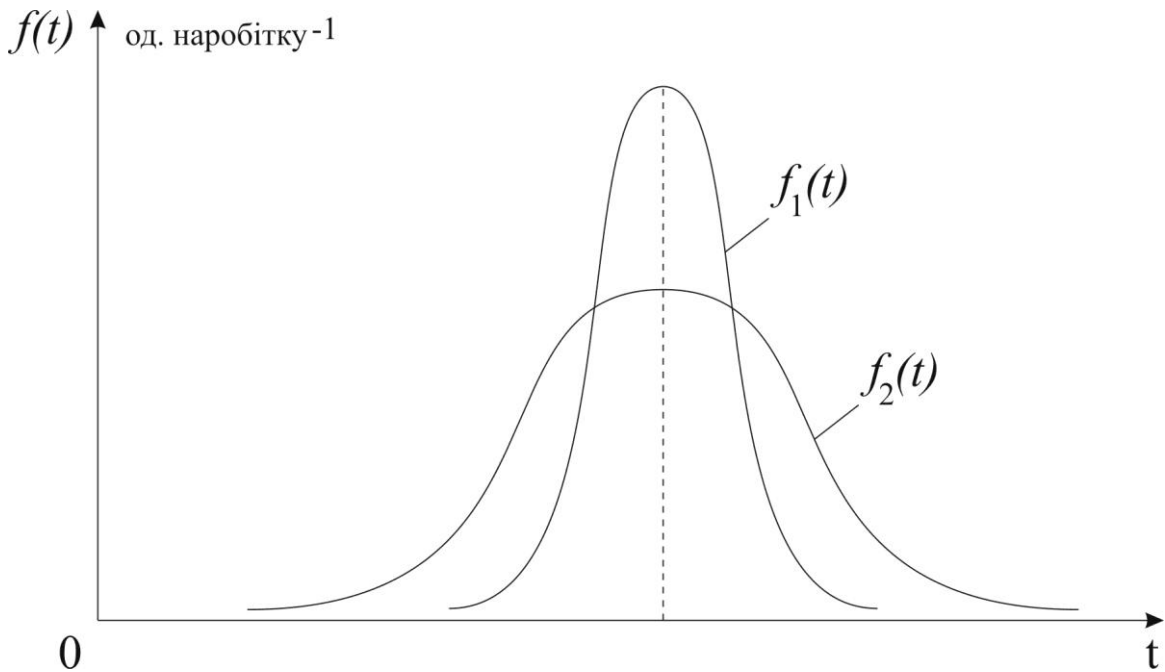


Рисунок 5.10 – Порівняння двох об'єктів з однаковим  $T_0$

Тому для оцінки надійності об'єкта за величиною  $T_0^*$  необхідно також знати і показник розсіювання випадкової величини  $T = \{t\}$  навколо середнього наробітку  $T_0$ .

До числа показників розсіювання відносяться *дисперсія та середньоквадратичне відхилення (СКВ) наробітку до відмови*.

*Дисперсія випадкової величини наробітку:*

– статистична оцінка:

$$D^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - T_0^*)^2 ; \quad (5.23)$$

– ймовірнісне визначення:

$$D = D\{T\} = M \left\{ (T - T_0)^2 \right\} = \int_0^{\infty} (t - T_0)^2 f(t) dt . \quad (5.24)$$

*СКВ випадкової величини наробітку:*

$$\left( \sigma^* \right)^2 = D^* \text{ або } \sigma^2 = \sigma^2(T) = D\{T\} . \quad (5.25)$$

Середній наробіток до відмови  $T_0$  і СКВ наробітку  $\sigma$  мають розмірність [од. наробітку], а дисперсія  $D$  – [од. наробітку<sup>2</sup>].

## 5.4 Математичні моделі теорії надійності.

### Нормальний закон розподілу наробітку до відмови

#### 5.4.1 Загальні поняття про моделі надійності

Для розв'язання завдань по оцінці надійності та прогнозуванню працездатності об'єкта необхідно мати математичну модель, що представлена аналітичними виразами одного з показників  $P(t)$ ,  $f(t)$  або  $\lambda(t)$ . Основний шлях для одержання моделі полягає у проведенні випробувань, обчисленні статистичних оцінок та їх апроксимації аналітичними функціями.

Надалі будуть розглянуті моделі, що використовуються в теорії надійності.

З'ясуємо, як змінюється безвідмовність об'єктів під час експлуатації, що дозволить класифікувати моделі та визначити можливості їх застосування.

Досвід експлуатації показує, що зміна інтенсивності відмов  $\lambda(t)$  переважної більшості об'єктів описується  $U$ -подібною кривою (рис. 5.11).

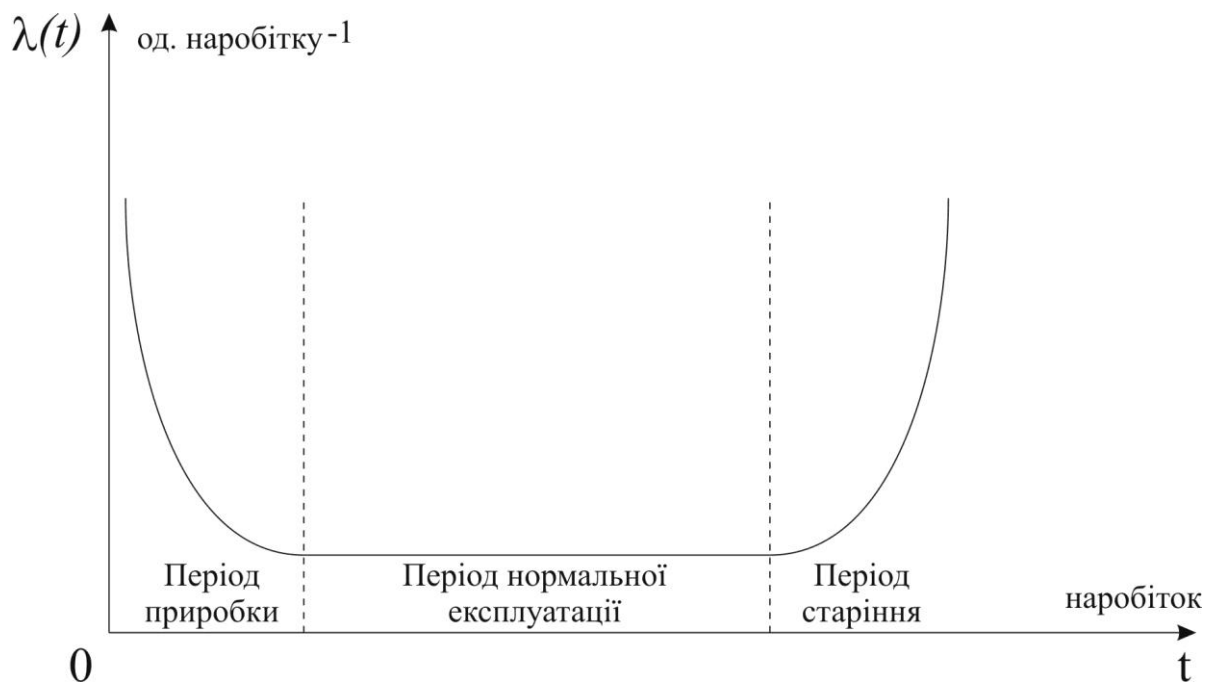


Рисунок 5.11 –  $U$ -подібна крива для інтенсивності відмов

Криву можна умовно розділити на три характерних ділянки:

- перша – період припрацювання;
- друга – період нормальної експлуатації;
- третя – період старіння об'єкта.

Період припрацювання об'єкта має підвищену інтенсивність відмов, викликану приробними відмовами, що зумовлені дефектами виробництва,

монтажу, налагодження. Іноді із закінченням цього періоду пов'язують гарантійне обслуговування об'єкта, коли усунення відмов здійснюється виробником.

У період нормальної експлуатації інтенсивність відмов зменшується і практично залишається постійною; при цьому відмови носять випадковий характер і з'являються раптово, насамперед, через недотримання умов експлуатації, випадкові зміни навантаження, несприятливі зовнішні фактори та ін. Саме цей період відповідає основному часу експлуатації об'єкта.

Зростання інтенсивності відмов відноситься до періоду старіння об'єкта і є викликаним збільшенням числа відмов від зношування, старіння та іншими причинами, пов'язаними із тривалою експлуатацією.

Вид аналітичної функції, що описує зміну показників надійності  $P(t)$ ,  $f(t)$  або  $\lambda(t)$ , визначає закон розподілу випадкової величини наробітку до відмови, який обирається залежно від властивостей об'єкта, умов його роботи та характеру відмов.

#### 5.4.2 Класичний нормальний розподіл наробітку до відмови

Нормальний розподіл або розподіл Гаусса є найбільш універсальним і зручним.

Вважається, що наробіток до відмови має нормальний розподіл (нормально розподілений), якщо щільність розподілу відмов описується наступним виразом:

$$f(t) = \frac{1}{b\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2b^2}}, \quad (5.26)$$

де  $a$  і  $b$  – параметри розподілу, відповідно, математичне очікування та середньоквадратичне відхилення, які за результатами випробувань приймаються:

$$a \approx T_0^*; \quad b^2 \approx D^*,$$

де  $T_0^*$  і  $D^*$  – оцінки середнього наробітку до відмови та дисперсії.

Графіки зміни показників безвідмовності при нормальному розподілі наведені на рис. 5.12.

З'ясуємо зміст параметрів  $T_0$  і  $\sigma$  нормального розподілу. Із графіка  $f(t)$  видно, що  $T_0$  є центром симетрії розподілу, оскільки при зміні знака різниці  $(t - T_0)$  вираз (5.26) не змінюється. При  $t = T_0$  щільність розподілу відмов досягає свого максимуму:

$$f(t)_{\max}|_{t=T_0} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}.$$



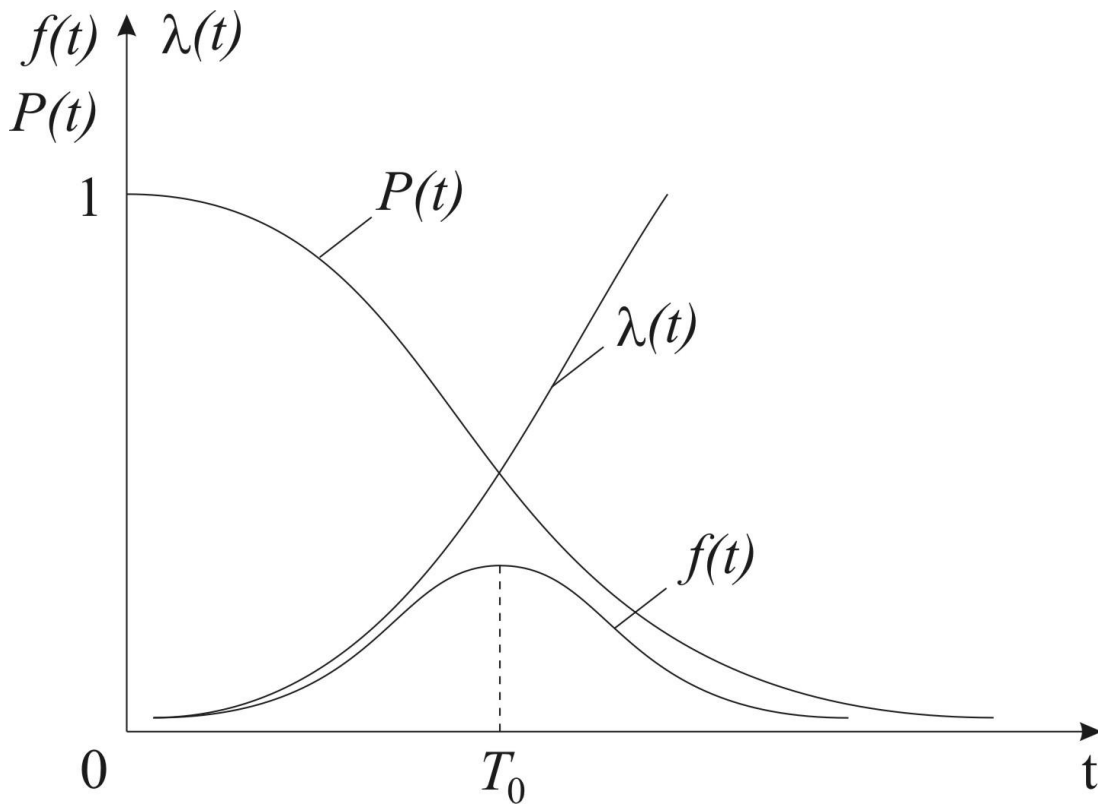


Рисунок 5.12 – Показники надійності для нормального закону розподілу випадкової величини наробітку до відмови

У разі зміщення від  $T_0$  вліво/вправо по осі абсцис, крива  $f(t)$  зміщується в ту ж сторону, не змінюючи своєї форми. Таким чином,  $T_0$  є центром розсіювання випадкової величини  $T$ , тобто математичним очікуванням.

Параметр  $\sigma$  характеризує форму кривої  $f(t)$ , тобто розсіювання випадкової величини  $T$ . Крива щільності розподілу відмов  $f(t)$  тим вище й гостріше, чим менше  $\sigma$ .

Графіки  $P(t)$  і  $\lambda(t)$  за різних середньоквадратичних відхилень наробітків ( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ ) і  $T_0 = const$  наведені на рис. 5.13–5.14.

Використовуючи отримані раніше співвідношення між показниками надійності, можна було б записати вирази для  $P(t)$ ,  $Q(t)$  і  $\lambda(t)$  за відомим виразом (5.26) для  $f(t)$ . Не треба мати багату фантазію, щоб представити громіздкість цих інтегральних виражень, тому для практичного розрахунку показників надійності обчислення інтегралів замінимо використанням таблиць.

Із цією метою перейдемо від випадкової величини  $T$  до наступної:

$$x = \frac{t - T_0}{\sigma}. \quad (5.27)$$

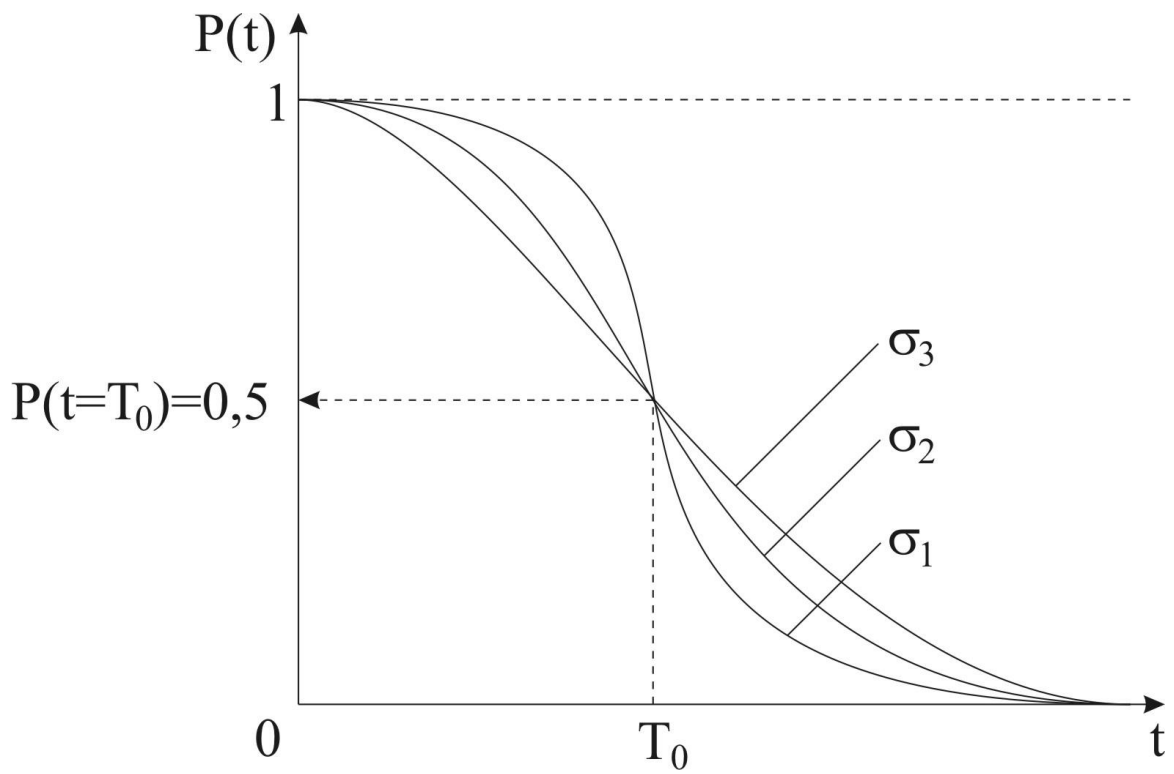


Рисунок 5.13 – Графіки  $P(t)$  за різних середньоквадратичних відхилень наробітків  
( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ )

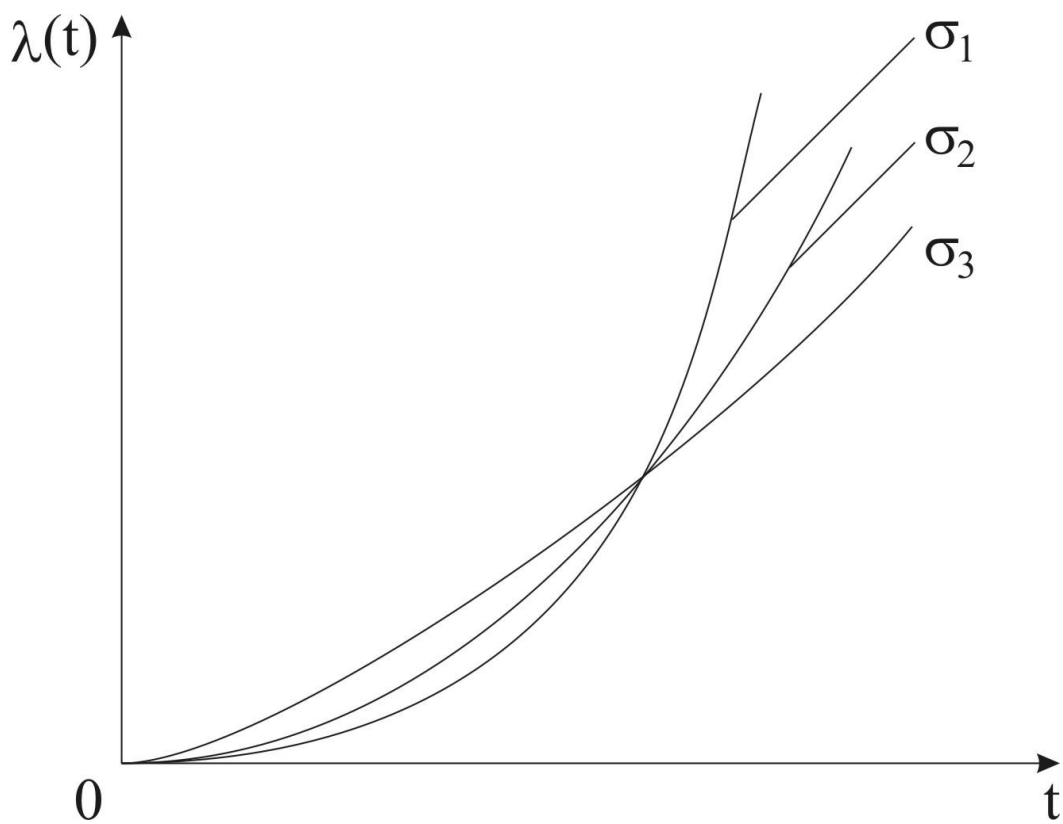


Рисунок 5.14 – Графіки  $\lambda(t)$  за різних середньоквадратичних відхилень наробітків  
( $\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$ )

Випадкова величина  $x$  розподілена нормально з параметрами  $M\{x\} = 0$  (математичне очікування) і  $\sigma\{x\} = 1$  (середньоквадратичне відхилення); при цьому щільність розподілу має наступний вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (5.28)$$

Вираз (5.28) описує щільність так званого нормованого нормального розподілу (рис. 5.15).

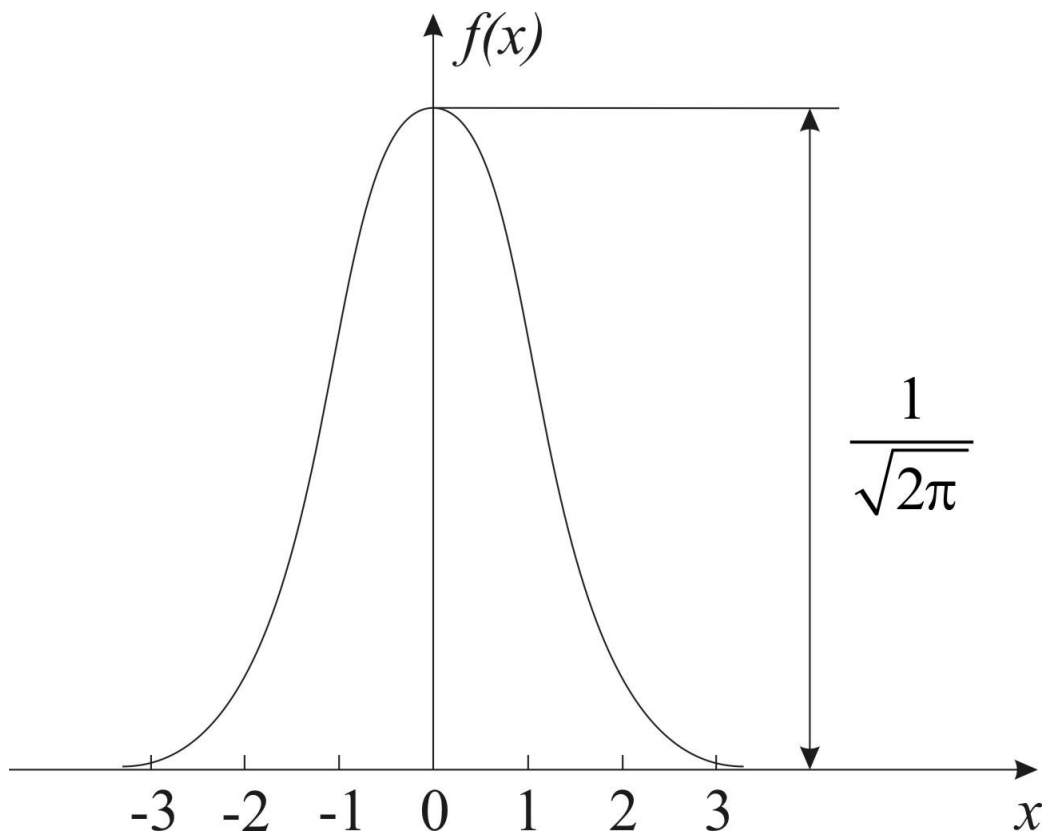


Рисунок 5.15 – Щільність нормованого нормального розподілу

Функція розподілу випадкової величини  $x$  записується наступним чином:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx. \quad (5.29)$$

Виходячи із симетрії кривої  $f(x)$  відносно математичного очікування  $M\{x\} = 0$ , має місце властивість:  $f(-x) = f(x)$ . Звідси  $F(-x) = 1 - F(x)$ .

У довідковій літературі наведені розрахункові значення функцій  $f(x)$  і  $F(x)$  для різних значень  $x$ .

Показники безвідмовності об'єкта через табличні значення  $f(x)$  і  $F(x)$  визначаються за допомогою виразів:

$$f(t) = \frac{f(x)}{\sigma}; \quad (5.30)$$

$$Q(t) = F(x); \quad (5.31)$$

$$P(t) = 1 - F(x); \quad (5.32)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(x)}{\sigma(1 - F(x))}. \quad (5.33)$$

При практичних розрахунках часто замість функції  $F(x)$  використовують функцію Лапласа, що являє собою розподіл позитивних значень випадкової величини  $x$  у вигляді:

$$\Phi(x) = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (5.34)$$

Очевидно, що  $F(x)$  пов'язана з  $\Phi(x)$  так:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx = \int_{-\infty}^0 f(x) dx + \int_0^x f(x) dx = 0,5 + \Phi(x). \quad (5.35)$$

Як і будь-яка функція розподілу, функція  $\Phi(x)$  має властивості:

$$\Phi(-\infty) = -0,5; \quad \Phi(\infty) = 0,5; \quad \Phi(-x) = -\Phi(x).$$

Показники надійності об'єкта можна визначити через  $\Phi(x)$ , використовуючи вирази (5.31)÷(5.33) і (5.35):

$$Q(t) = 0,5 + \Phi(x); \quad (5.36)$$

$$P(t) = 0,5 - \Phi(x); \quad (5.37)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(x)}{\sigma(0,5 - \Phi(x))}. \quad (5.38)$$

Найчастіше при оцінці надійності об'єкта доводиться вирішувати *пряме завдання* – за заданих параметрів  $T_0$  і  $\sigma$  нормально розподіленого наробітку до відмови необхідно визначити відповідний показник безвідмовності (наприклад, імовірність безвідмовної роботи) для заданого значення наробітку  $t$ .

Але в ході проєктних робіт доводиться вирішувати і *зворотне завдання* – визначити наробіток  $t$ , що відповідає необхідній за технічним завданням імовірності безвідмовної роботи об'єкта  $P(t)$ .

Для розв'язання подібних завдань використовують квантилі нормованого нормального розподілу.

*Квантиль* – значення випадкової величини, що відповідає заданій імовірності.

Позначимо:

$t_p$  – значення наробітку, що відповідає ймовірності безвідмовної роботи  $P$ ;

$x_p$  – значення випадкової величини  $x$ , що відповідає ймовірності  $P$ .

Тоді з рівняння зв'язку  $x$  і  $t$

$$x_p = \frac{t_p - T_0}{\sigma}$$

одержуємо:

$$t_p = T_0 + x_p \sigma,$$

де  $t_p$ ,  $x_p$  – ненормовані та нормовані квантилі нормального розподілу, що відповідають імовірності  $P$ .

Значення квантилей  $x_p$  наведені в довідковій літературі для  $P \geq 0,5$ .

За заданої ймовірності  $P < 0,5$  використовують співвідношення:

$$x_p = -x_{1-p}.$$

Наприклад, при  $P = 0,3$

$$x_{0,3} = -x_{1-0,3} = -x_{0,7}.$$

Ймовірність потрапляння випадкової величини наробітку  $T$  у заданий інтервал  $[t_1, t_2]$  наробітку визначається:

$$P\{T \in [t_1, t_2]\} = F(x_2) - F(x_1) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1), \quad (5.39)$$

де  $x_1 = \frac{t_1 - T_0}{\sigma}$ ,  $x_2 = \frac{t_2 - T_0}{\sigma}$ .

Відзначимо, що наробіток до відмови є завжди позитивним, а крива щільності розподілу відмов  $f(t)$ , у загальному випадку, починається від  $t = -\infty$  і поширюється до  $t = \infty$ .

Це не є істотним недоліком, якщо  $T_0 \gg \sigma$ , оскільки за формулою (5.39) неважко обчислити, що ймовірність потрапляння випадкової величини  $T$  в інтервал  $P\{T_0 - 3\sigma < T < T_0 + 3\sigma\} \approx 1$  з точністю до 1%. А це означає, що всі можливі значення (з похибкою не більше 1%) нормально розподіленої випадкової величини  $T$ , зі співвідношенням характеристик  $T_0 > 3\sigma$ , перебувають на ділянці  $T_0 \pm 3\sigma$ .

В разі більшого розкиду значень випадкової величини  $T$  область можливих значень обмежується ліворуч  $(0, \infty)$  і використовується усічений нормальний розподіл.

#### 5.4.3 Усічений нормальний розподіл

Відомо, що коректність використання класичного нормального розподілу наробітку  $T$  досягається при  $T_0 \geq 3\sigma$ . За малих значень  $T_0$  і великого  $\sigma$  може виникати ситуація, коли щільність розподілу відмов  $f(t)$  «покриває» своєю лівою гілкою область негативних наробітків (рис. 5.16).

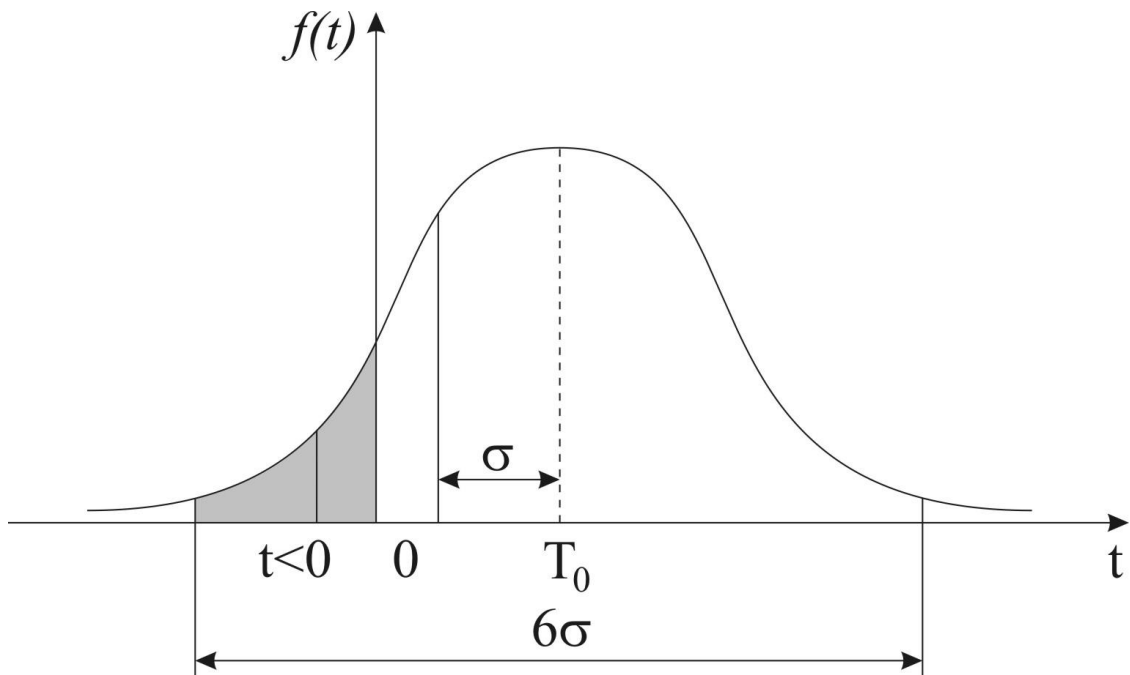


Рисунок 5.16 – Нормальний розподіл при  $T_0 < 3\sigma$

Таким чином, нормальний розподіл, що являє собою загальний випадок розподілу випадкової величини в діапазоні  $(-\infty, \infty)$ , лише за певних умов може бути використаний для моделей надійності.

Усіченим нормальним розподілом називається розподіл, що може бути одержаний із класичного нормального при обмеженні інтервалу можливих значень наробітку до відмови.

У загальному випадку усікання може бути:

– лівим –  $(0, \infty)$ ;

– двостороннім –  $(t_1, t_2)$ .

Розглянемо усічений нормальний розподіл (УНР) у випадку обмеження випадкової величини наробітку інтервалом  $(t_1, t_2)$ .

Щільність УНР  $\bar{f}(t) = c \cdot f(t)$ ,

де 
$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_0)^2}{2\sigma^2}};$$

$c$  – нормуючий множник, який визначається з умови, що площа під кривою  $\bar{f}(t)$  дорівнює 1, тобто:

$$\int_{t_1}^{t_2} \bar{f}(t) dt = c \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = 1.$$

Звідси

$$c = \frac{1}{\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt},$$

де 
$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = P\{t_1 < T < t_2\} = F(t_2) - F(t_1) = Q(t_2) - Q(t_1).$$

Застосовуючи перехід від випадкової величини  $T$  до величини  $x$

$$x_1 = \frac{t_1 - T_0}{\sigma}, \quad x_2 = \frac{t_2 - T_0}{\sigma},$$

отримаємо:

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = Q(t_2) - Q(t_1) = 0,5 + \Phi(x_2) - 0,5 - \Phi(x_1) = \Phi(x_2) - \Phi(x_1).$$

Таким чином, нормуючий множник дорівнює:

$$c = \frac{1}{\Phi(x_2) - \Phi(x_1)}.$$

Оскільки  $(\Phi(x_2) - \Phi(x_1)) < 1$ , то  $c > 1$  і  $\bar{f}(t) > f(t)$ . Крива  $\bar{f}(t)$  є вищою за  $f(t)$ , тому що площі під кривими  $\bar{f}(t)$  і  $f(t)$  є однаковими та дорівнюють 1 (рис. 5.17), при цьому:

$$\int_{T_0-3\sigma}^{T_0+3\sigma} f(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} \bar{f}(t) dt \quad (\text{з похибкою } \leq 1 \%).$$

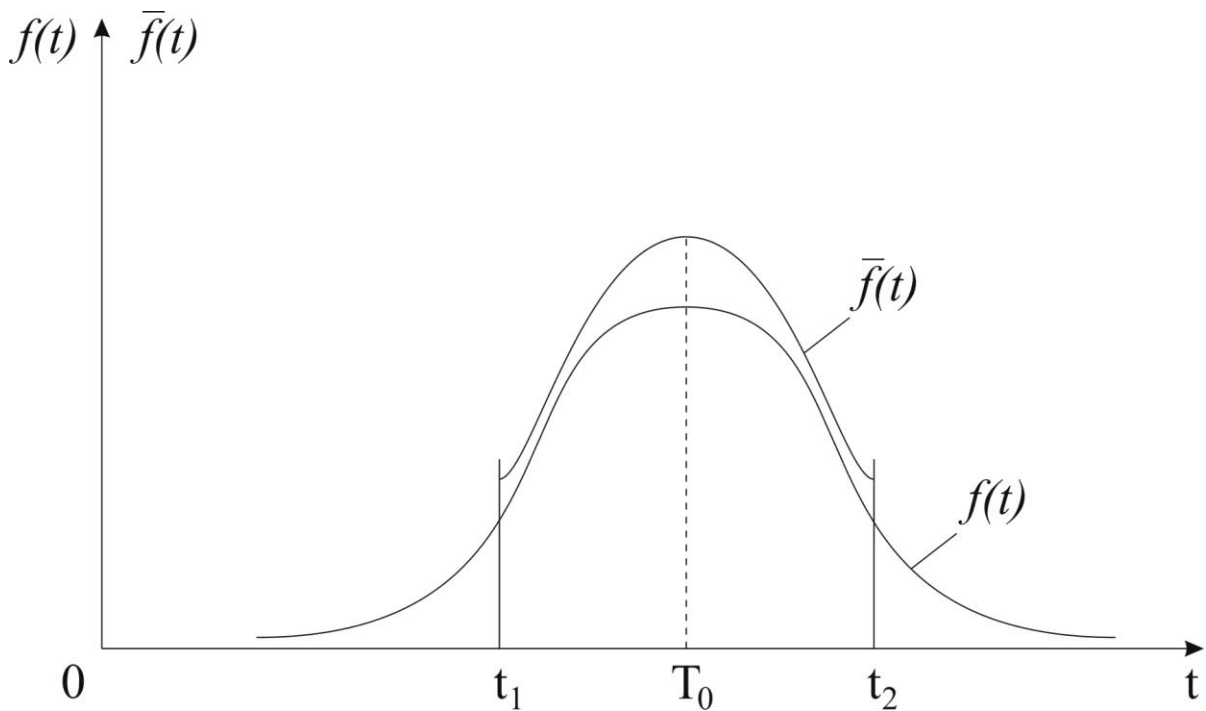


Рисунок 5.17 – Усічений нормальний розподіл

Показники безвідмовності для УНР у діапазоні  $(t_1, t_2)$  мають наступний вигляд:

$$\bar{f}(t) = cf(t) = \frac{cf(x)}{\sigma}; \quad (5.40)$$



$$\bar{P}(t) = c \int_t^{\infty} f(t) dt = c [0,5 - \Phi(x)]; \quad (5.41)$$

$$\bar{Q}(t) = 1 - c [0,5 - \Phi(x)]; \quad (5.42)$$

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\bar{f}(t)}{\bar{P}(t)} = \frac{f(x)}{\sigma [0,5 - \Phi(x)]} = \lambda(t). \quad (5.43)$$

УНР для позитивного наробітку до відмови – діапазон  $(0, \infty)$ , має щільність розподілу відмов:

$$\bar{f}(t) = c_0 \cdot f(t),$$

де  $c_0$  – нормуючий множник, що визначається з умови:

$$c_0 \int_0^{\infty} f(t) dt = 1,$$

і, з урахуванням того, що  $x = \frac{t - T_0}{\sigma}$ , а  $\Phi(-x) = -\Phi(x)$ , дорівнює:

$$c_0 = \frac{1}{\int_0^{\infty} f(t) dt} = \frac{1}{Q(\infty) - Q(0)} = \frac{1}{\Phi(\infty) - \Phi\left(-\frac{T_0}{\sigma}\right)} = \frac{1}{0,5 + \Phi\left(\frac{T_0}{\sigma}\right)}.$$

Показники безвідмовності для даного УНР мають вигляд:

$$\bar{f}(t) = \frac{c_0 f(x)}{\sigma}; \quad (5.44)$$

$$\bar{P}(t) = c_0 \int_t^{\infty} f(t) dt = c_0 [0,5 - \Phi(x)]; \quad (5.45)$$

$$\bar{Q}(t) = 1 - c_0 [0,5 - \Phi(x)]; \quad (5.46)$$

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\bar{f}(t)}{P(t)} = \frac{f(x)}{\sigma[0,5 - \Phi(x)]} = \lambda(t). \quad (5.47)$$

Залежність нормуючого множника  $c_0$  від співвідношення  $\frac{T_0}{\sigma}$  наведено на рис. 5.18.

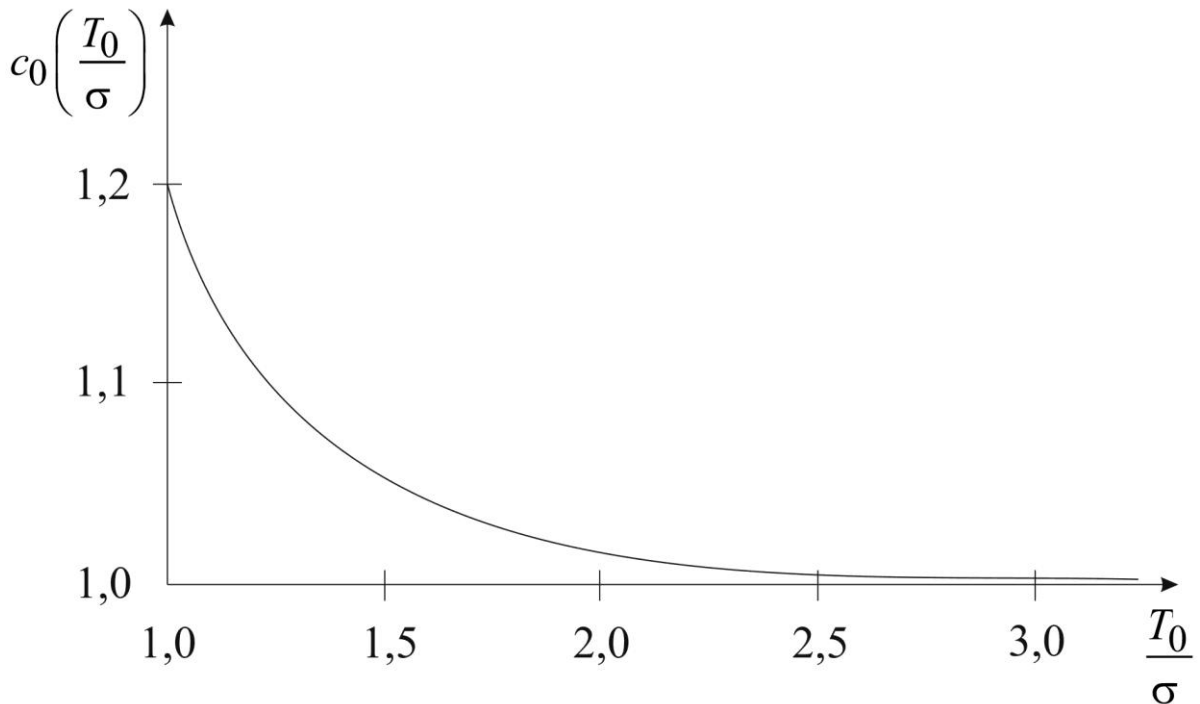


Рисунок 5.18 – Залежність нормуючого множника  $c_0$  від співвідношення  $\frac{T_0}{\sigma}$

При  $T_0 = \sigma$ ,  $\frac{T_0}{\sigma} = 1$ , а  $c_0 \approx 1,2$ .

При  $\frac{T_0}{\sigma} \geq 2,5$ ,  $c_0 \approx 1$ , тобто  $\bar{f}(t) = f(t)$ .

## 5.5 Закони розподілу наробітку до відмови

### 5.5.1 Експоненційний розподіл наробітку до відмови

Експоненційний розподіл описує наробіток до відмови об'єктів, у яких в результаті здавальних випробувань (вихідного контролю) відсутній період припрацювання, а призначений ресурс встановлений до закінчення періоду нормальної експлуатації.

Ці об'єкти можна віднести до «нестаріючих», оскільки вони працюють тільки на ділянці з  $\lambda(t) = \lambda = const$ . Коло таких об'єктів є достатньо широ-

ким: складні технічні системи з великою кількістю компонентів, обчислювальна техніка, системи автоматичного регулювання тощо. Експоненційний розподіл широко застосовується для оцінки надійності енергетичних об'єктів.

Вважається, що випадкова величина наробітку об'єкта до відмови має експоненційний розподіл, якщо щільність розподілу відмов описується виразом:

$$f(t) = \alpha e^{-\alpha t}, \quad (5.48)$$

де  $\alpha$  – параметр розподілу, що за результатами випробувань приймається рівним:

$$\alpha \approx \frac{1}{T_0^*},$$

де  $T_0^*$  – оцінка середнього наробітку до відмови.

Інші показники безвідмовності визначаються наступним чином:

– *ймовірність безвідмовної роботи*

$$P(t) = e^{-\alpha t}; \quad (5.49)$$

– *ймовірність відмови*

$$Q(t) = 1 - e^{-\alpha t}; \quad (5.50)$$

– *інтенсивність відмов*

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{\alpha e^{-\alpha t}}{e^{-\alpha t}} = \alpha. \quad (5.51)$$

З виразу (5.51) видно, що інтенсивність відмов – постійна величина, яка не залежить від часу і є обернено пропорційною оцінці середнього наробітку до відмови:  $\lambda(t) = \lambda \approx \frac{1}{T_0^*}$ .

Числові характеристики наробітку до відмови визначаються за допомогою виразів:

– *середній наробіток (математичне очікування наробітку) до відмови*

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\lambda}; \quad (5.52)$$

– дисперсія наробітку до відмови

$$D = D\{T\} = \int_0^{\infty} (t - T_0)^2 f(t) dt = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (5.53)$$

Графіки показників безвідмовності при експоненційному розподілі наробітку до відмови наведені на рис. 5.19.

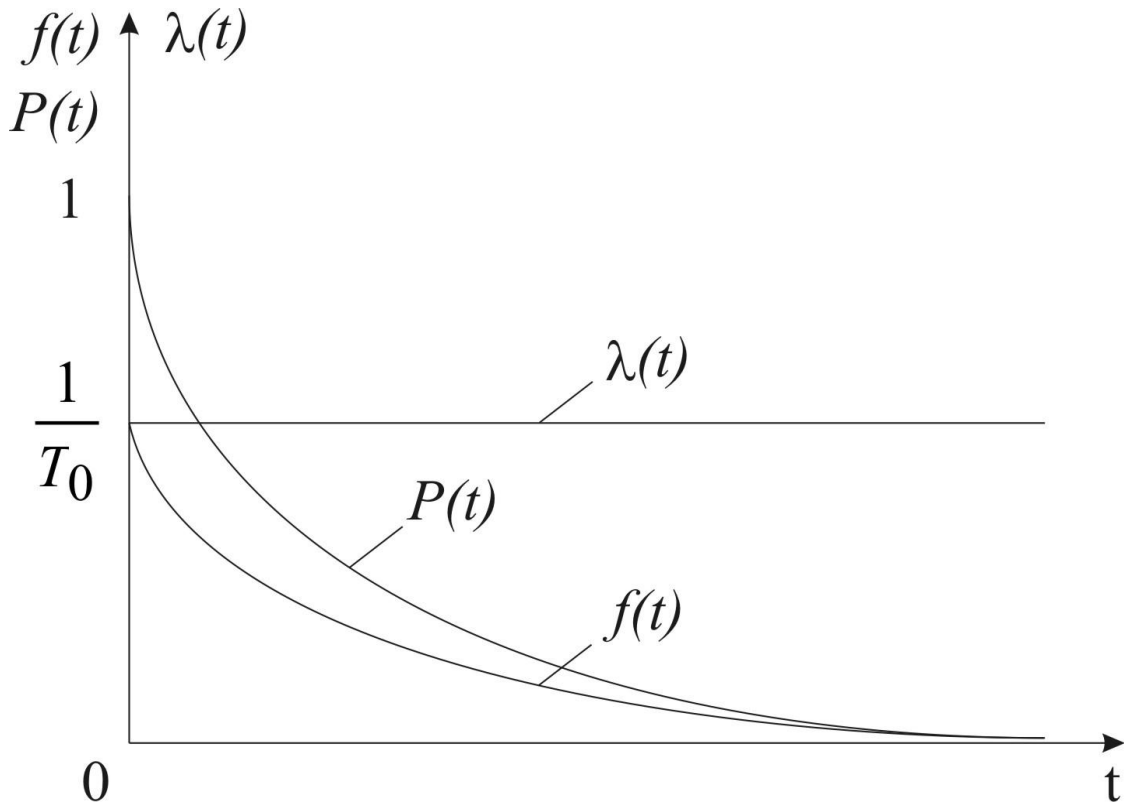


Рисунок 5.19 – Графіки показників надійності при експоненційному розподілі наробітку до відмови

Слід зазначити, що при  $\lambda t \ll 1$ , тобто при наробітку  $t$  набагато меншому, ніж середній наробіток до відмови  $T_0$ , вирази (5.48–5.51) можна спростити, замінивши двома першими членами розкладання  $e^{-\lambda t}$  у степеневий ряд.

Наприклад, вираз для ймовірності безвідмовної роботи буде мати вигляд:

$$P(t) = 1 - \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} - \frac{(\lambda t)^3}{3!} + \dots \approx 1 - \lambda t,$$

при цьому похибка обчислення  $P(t)$  не перевищує  $0,5(\lambda t)^2$ .

Розглянемо закони розподілу наробітку до відмови, що використовуються на практиці для опису надійності «старіючих» об'єктів, для яких є характерними відмови внаслідок зношення.

### 5.5.2 Логарифмічно нормальний розподіл наробітку до відмови

При логарифмічно нормальному розподілі нормально розподіленим є логарифм  $\lg t$  випадкової величини  $T$ , а не сама дана величина.

Логарифмічно нормальний розподіл багато в чому більш точно, ніж нормальний розподіл, описує наробіток до відмови тих об'єктів, у яких відмова виникає внаслідок втоми, наприклад, підшипників кочення тощо.

Якщо величина  $\lg t$  має нормальний розподіл з параметрами: математичне очікування  $U$  і середньоквадратичне відхилення  $V$ , то величина  $T$  вважається логарифмічно нормально розподіленою зі щільністю розподілу відмов  $f(t)$ , яка описується наступним виразом:

$$f(t) = \frac{1}{Vt\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\lg t - U)^2}{2V^2}}. \quad (5.54)$$

Параметри  $U$  і  $V$  за результатами випробувань приймаються:

$$U \approx U^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lg t_i, \quad (5.55)$$

$$V \approx V^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lg t_i - U^*)^2, \quad (5.56)$$

де  $U^*$  і  $V^*$  – оцінки параметрів  $U$  і  $V$ .

Показники надійності можна обчислити за допомогою виразів (5.30), (5.36)÷(5.38), користуючись табличними функціями  $f(x)$  і, відповідно,  $\Phi(x)$

для нормального розподілу при  $x = \frac{\lg t - U}{V}$ .

Графіки показників надійності при логарифмічно нормальному розподілі наробітку до відмови наведені на рис. 5.20.

Числові характеристики наробітку до відмови:

– середній наробіток (математичне очікування наробітку) до відмови

$$T_0 = e^{\left( U + \frac{V^2}{2} \right)}; \quad (5.57)$$

– дисперсія наробітку до відмови

$$D = D\{T\} = e^{(2U+V^2)} [e^{V^2} - 1]. \quad (5.58)$$

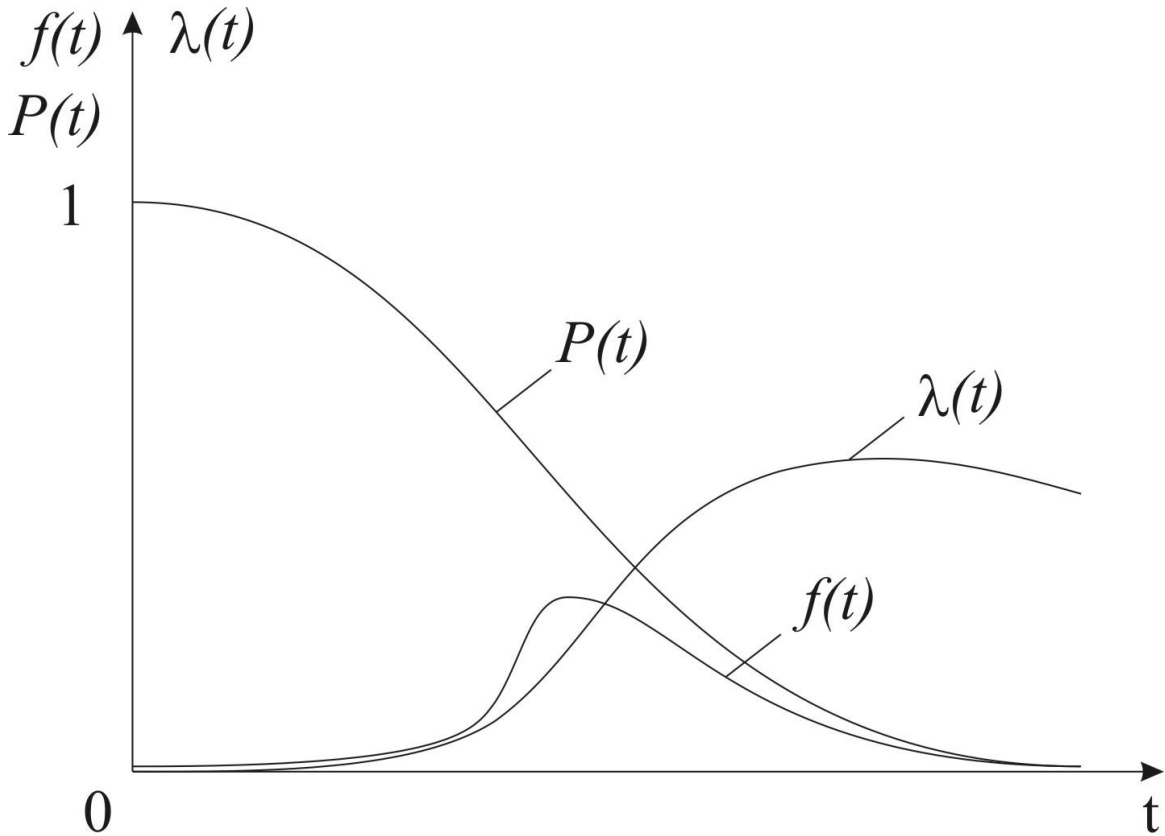


Рисунок 5.20 – Графіки показників надійності при логарифмічно нормальному розподілі наробітку до відмови

### 5.5.3 Гамма-розподіл наробітку до відмови

Випадкова величина наробітку до відмови  $T$  має гамма-розподіл з параметрами  $\alpha$  (масштабний параметр) і  $\beta$  (параметр форми), де  $\alpha > 0$ ,  $\beta > 0$ , причому  $\beta$  – ціле число, якщо її щільність розподілу відмов описується виразом:

$$f(t) = \frac{\alpha^\beta t^{\beta-1}}{\Gamma(\beta)} e^{-\alpha t}, \quad (5.59)$$

де  $\Gamma(\beta) = (\beta - 1)!$  – гамма-функція Ейлера. Очевидно, що при  $\beta = 1$  вираз (5.59) спрощується до виду (5.48), що відповідає експоненційному розподілу.

Гамма-розподіл застосовується для опису розподілу суми незалежних випадкових величин, кожна з яких є розподіленою за експоненційним законом.

За збільшення  $\beta$  гамма-розподіл сходиться до нормального розподілу з параметрами:  $a = \beta \cdot \alpha$ ,  $b = \beta \cdot \alpha^2$  (5.26).

Графіки зміни показників надійності при гамма-розподілі наробітку до відмови наведені на рис. 5.21.

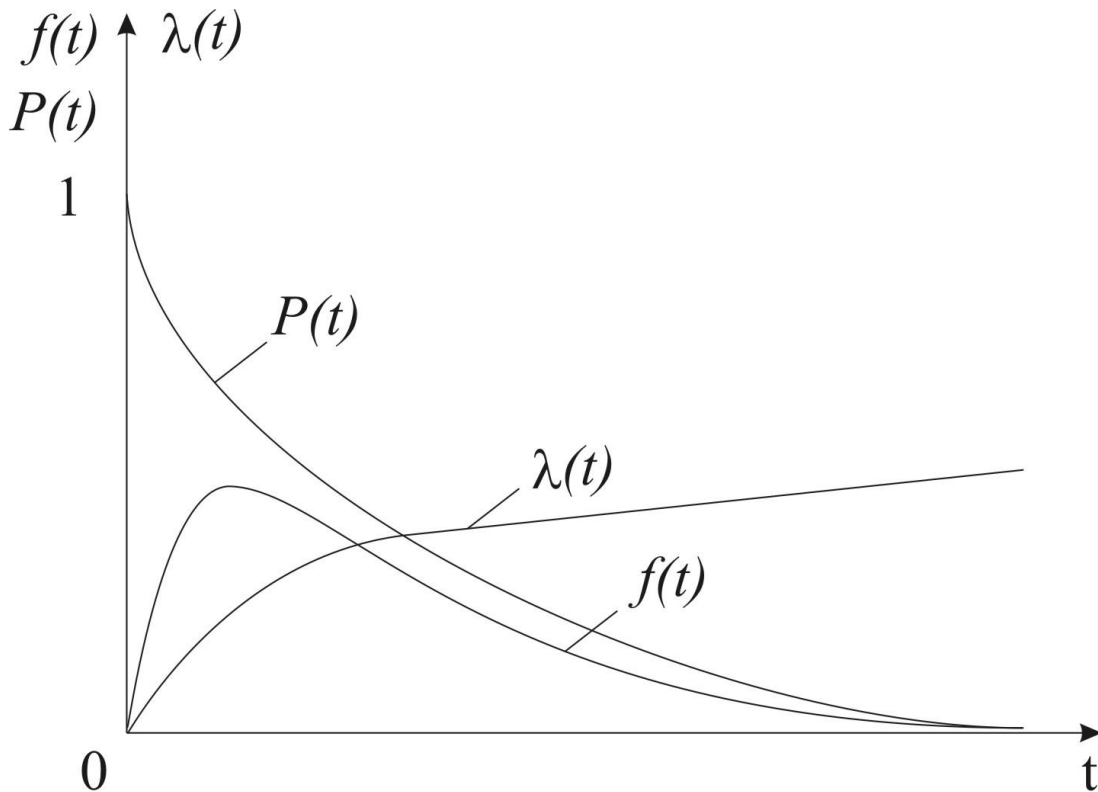


Рисунок 5.21 – Графіки показників надійності при гамма-розподілі наробітку до відмови

Числові характеристики наробітку до відмови:

– середній наробіток (математичне очікування наробітку) до відмови

$$T_0 = \frac{\beta}{\alpha}; \quad (5.60)$$

– дисперсія наробітку до відмови

$$D = D\{T\} = \frac{\beta}{\alpha^2}. \quad (5.61)$$

### 5.5.4 Розподіл Релея наробітку до відмови

Крім розглянутих вище законів розподілу, в якості моделей надійності об'єктів можуть використовуватися також інші, наприклад, розподіл Вейбулла, розподіл Релея, розподіл Ерланга тощо.

Для закону розподілу Релея наробітку до відмови показники надійності об'єкта визначаються наступним чином:

$$P(t) = e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}}; \quad (5.62)$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}}; \quad (5.63)$$

$$f(t) = \frac{t}{\sigma_t^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}}; \quad (5.64)$$

$$\lambda(t) = \frac{t}{\sigma_t^2}; \quad (5.65)$$

$$T_0 = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad (5.66)$$

де  $\sigma_t$  – мода розподілу випадкової величини  $T$ .

### 5.6 Визначення показників надійності за допомогою статистичної обробки результатів випробувань

За результатами випробувань  $N$  невідновлюваних однакових об'єктів отримано статистичну вибірку – масив наробітку (у будь-яких одиницях виміру) до відмови кожного з  $N$  об'єктів, що випробовувалися. Вибірка характеризує випадкову величину наробітку до відмови об'єкта  $T = \{t\}$ .

Необхідно вибрати закон розподілу випадкової величини  $T$  і перевірити правильність вибору за відповідним критерієм.

Підбір закону розподілу здійснюється на основі апроксимації (згладжування) експериментальних даних про наробіток до відмови, які повинні бути представлені в найбільш компактному графічному вигляді. Вибір апроксимуючої функції носить характер гіпотези, що висуває дослідник. Експериментальні дані можуть із більшою або меншою правдоподібністю підтверджувати або не підтверджувати справедливості гіпотези. Тому дослідник повинен



одержати відповідь на питання: чи узгоджуються результати експерименту з гіпотезою про те, що випадкова величина наробітку до відмови має обраний закон розподілу? Відповідь на це питання можна отримати в результаті розрахунку спеціальних критеріїв.

### 5.6.1 Формування статистичного ряду

За великої кількості об'єктів, що поставлені на випробування, отриманий масив наробітків  $\{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_N\}$  є громіздкою та мало наочною формою запису випадкової величини  $T$ . Тому для компактності та наочності вибірка подається у графічному зображенні статистичного ряду – гістограмі наробітку до відмови.

Для цього необхідно:

– встановити інтервал наробітку  $[t_{\min}, t_{\max}]$  та його довжину  $\zeta_t = t_{\max} - t_{\min}$ , де  $t_{\min} = \min_{i=1, \dots, N} \{t_i\}$ ,  $t_{\max} = \max_{i=1, \dots, N} \{t_i\}$ ;

– розбити інтервал наробітку  $[t_{\min}, t_{\max}]$  на  $k$  інтервалів рівної ширини  $\Delta t$  – крок гістограми:

$$\Delta t = \frac{\zeta_t}{k}, \quad \Delta t = t_{i+1} - t_i = t_i - t_{i-1};$$

– обчислити частоти появи відмов у всіх  $k$  інтервалах:

$$P_i^* = \frac{\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)}{N} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N},$$

де  $\Delta n(t_i, t_i + \Delta t)$  – кількість об'єктів, що відмовили в інтервалі  $[t_i, t_i + \Delta t]$ .

Очевидно, що

$$\sum_{i=1}^k P_i^* = 1;$$

– отриманий статистичний ряд представляється у вигляді гістограми, що будується наступним чином. По осі абсцис  $t$  відкладаються інтервали  $\Delta t$ , на кожному з яких будується прямокутник, висота якого є пропорційною (в обраному масштабі) відповідній частоті  $P_i^*$ . Можливий вигляд гістограми наведений на рис. 5.22.

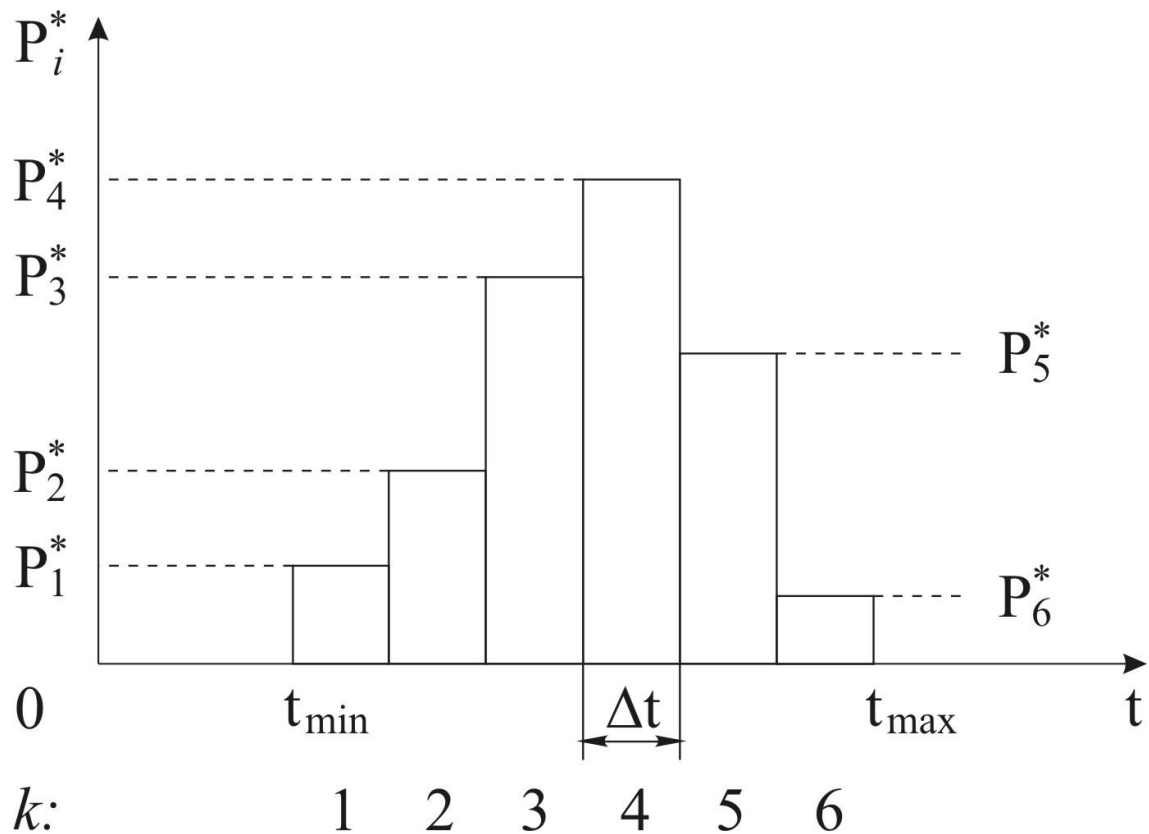


Рисунок 5.22 – Гістограма наробітку до відмови

### 5.6.2 Розрахунок емпіричних функцій

Використовуючи дані сформованого статистичного ряду, визначаються статистичні оцінки показників надійності, тобто емпіричні функції:

– *функція розподілу відмов (оцінка ймовірності відмов)*

$$Q^*(t_{\min}) = \frac{n(t_{\min})}{N} = 0;$$

$$Q^*(t_1) = \frac{n(t_1)}{N} = \frac{\Delta n(t_{\min}, t_1)}{N} = P_1^*;$$

$$Q^*(t_2) = \frac{n(t_2)}{N} = \frac{\Delta n(t_{\min}, t_1) + \Delta n(t_1, t_2)}{N} = P_1^* + P_2^*;$$

$$Q^*(t_{\max}) = \frac{n(t_{\max})}{N} = \sum_{i=1}^k P_i^* = 1;$$

– *функція надійності (оцінка ймовірності безвідмовної роботи)*

$$P^*(t_{\min}) = 1 - Q^*(t_{\min}) = 1;$$

...

$$P^*(t_{\max}) = 1 - Q^*(t_{\max}) = 0;$$

– щільність розподілу відмов (оцінка щільності розподілу відмов)

$$f^*(t_i) = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N \cdot \Delta t} = \frac{P_i^*}{\Delta t};$$

– інтенсивність відмов (оцінка інтенсивності відмов)

$$\lambda^*(t_i) = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{N(t_i) \cdot \Delta t} = \frac{\Delta n(t_i, t_{i+1})}{[N - n(t_i)] \cdot \Delta t}.$$

На рис. 5.23–5.25 наведено відповідно графіки статистичних оцінок  $Q^*(t)$ ,  $P^*(t)$ ,  $f^*(t)$  і  $\lambda^*(t)$ .

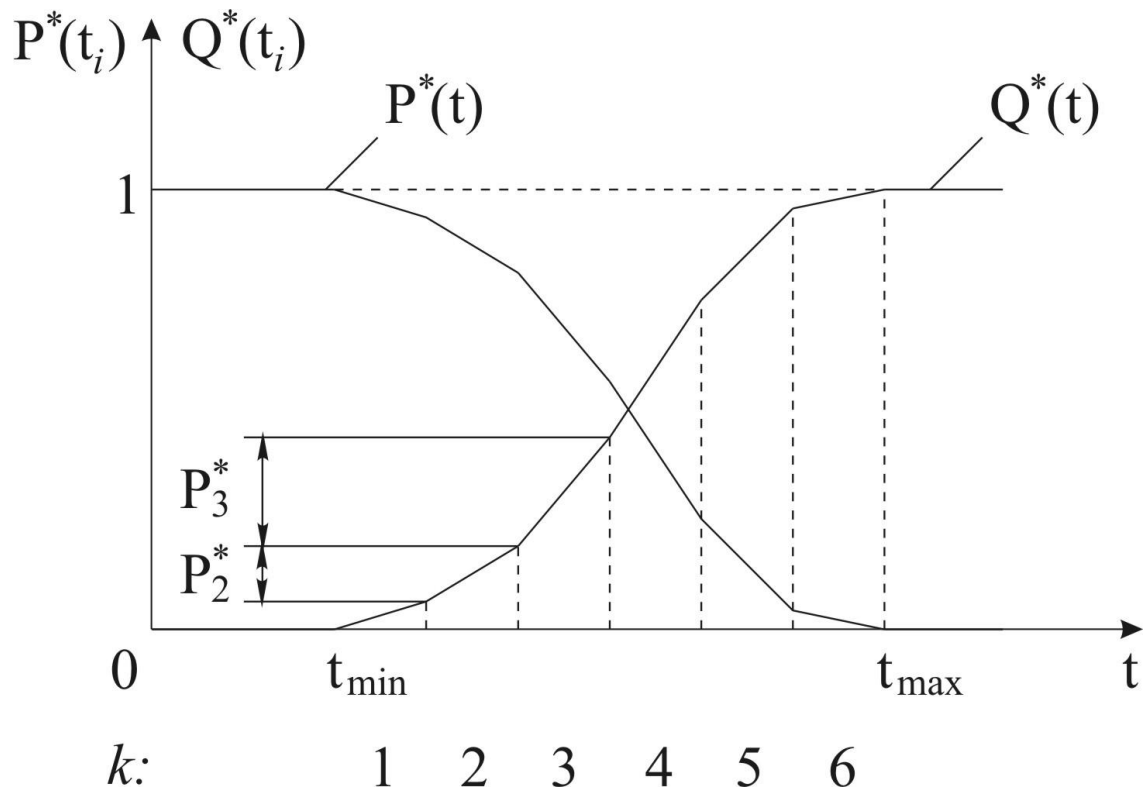


Рисунок 5.23 – Графіки статистичних оцінок  $Q^*(t)$  та  $P^*(t)$

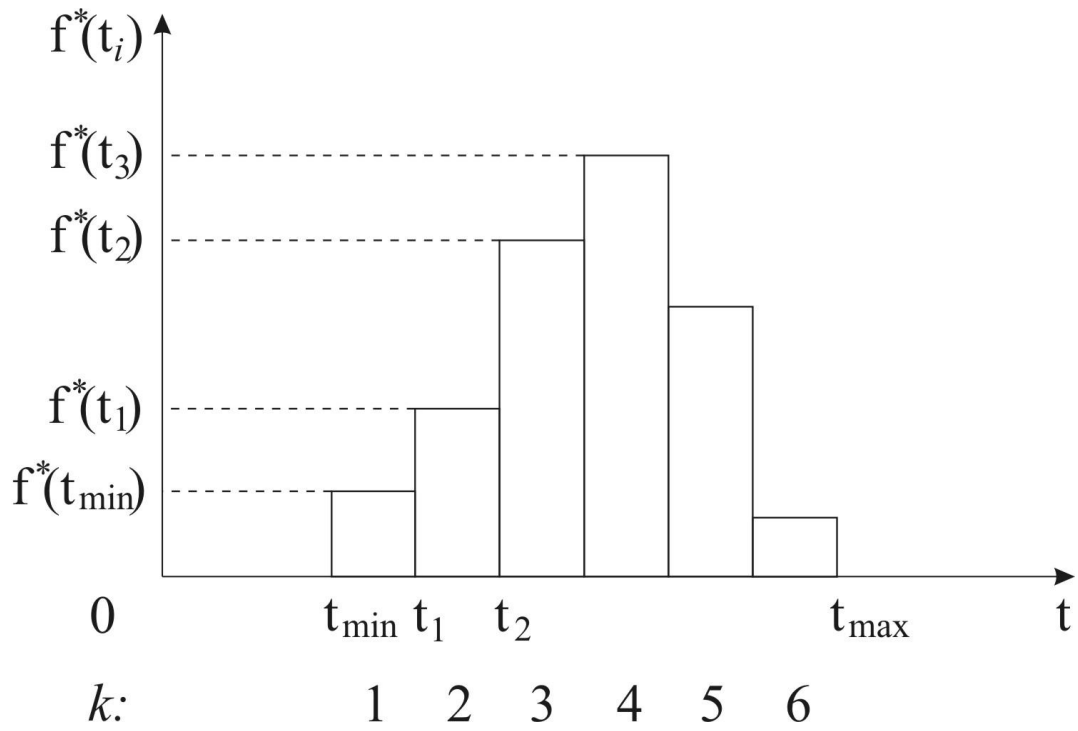


Рисунок 5.24 – Статистична оцінка  $f^*(t)$

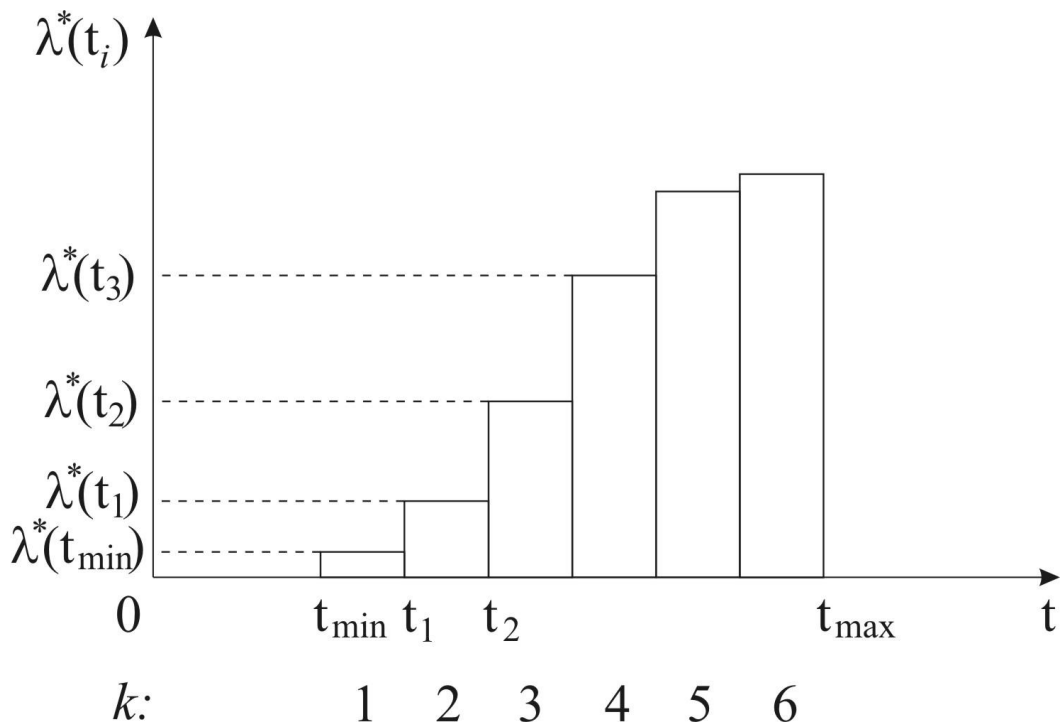


Рисунок 5.25 – Статистична оцінка  $\lambda^*(t)$

Побудова графіків здійснюється за допомогою наведених вище розрахункових формул. Кожен із графіків має свій масштаб.

### 5.6.3 Розрахунок статистичних оцінок числових характеристик надійності

Для розрахунку статистичних оцінок числових характеристик можна скористатися даними сформованого статистичного ряду.

Оцінки характеристик визначаються наступним чином:

– оцінка середнього наробітку до відмови

$$T_0^* = \sum_{i=1}^k \tilde{t}_i \cdot P_i^* ;$$

– оцінка дисперсії наробітку до відмови (емпірична дисперсія наробітку)

$$D^* = \sum_{i=1}^k (\tilde{t}_i - T_0^*)^2 \cdot P_i^* ,$$

де  $\tilde{t}_i = t_i + \frac{\Delta t}{2} = t_{i+1} - \frac{\Delta t}{2}$  – середина  $i$ -го інтервалу наробітку, тобто середнє значення наробітку в інтервалі.

Оцінка середньоквадратичного відхилення  $D^* = (\sigma^*)^2$ .

Доцільно розрахувати оцінки деяких допоміжних характеристик розсіювання випадкової величини  $T$ :

– вибірковий коефіцієнт асиметрії наробітку до відмови

$$A = \sum_{i=1}^k \frac{(\tilde{t}_i - T_0^*)^3 \cdot P_i^*}{(\sigma^*)^3} ;$$

– вибірковий ексцес наробітку до відмови

$$E = \left[ \sum_{i=1}^k \frac{(\tilde{t}_i - T_0^*)^4 \cdot P_i^*}{(\sigma^*)^4} \right] - 3.$$

Дані характеристики використовуються для вибору апроксимуючої функції. Так, коефіцієнт асиметрії є характеристикою «скошеності» розподілу. Наприклад, якщо розподіл є симетричним відносно математичного очікування, то  $A = 0$ . На рис. 5.26 розподіл  $f_2(t)$  має позитивну асиметрію ( $A > 0$ ), а  $f_3(t)$  – негативну ( $A < 0$ ).

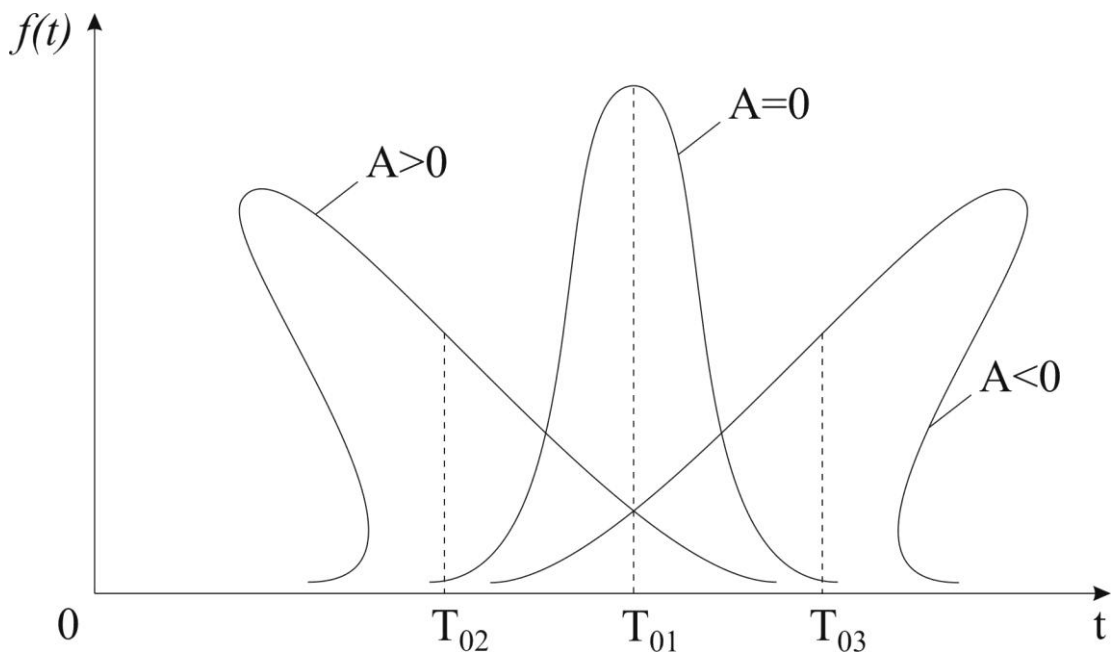


Рисунок 5.26 – Вплив вибіркового коефіцієнта асиметрії наробітку до відмови

Екссес характеризує «крутість» розподілу (рис. 5.27). Для нормального розподілу  $E = 0$ .

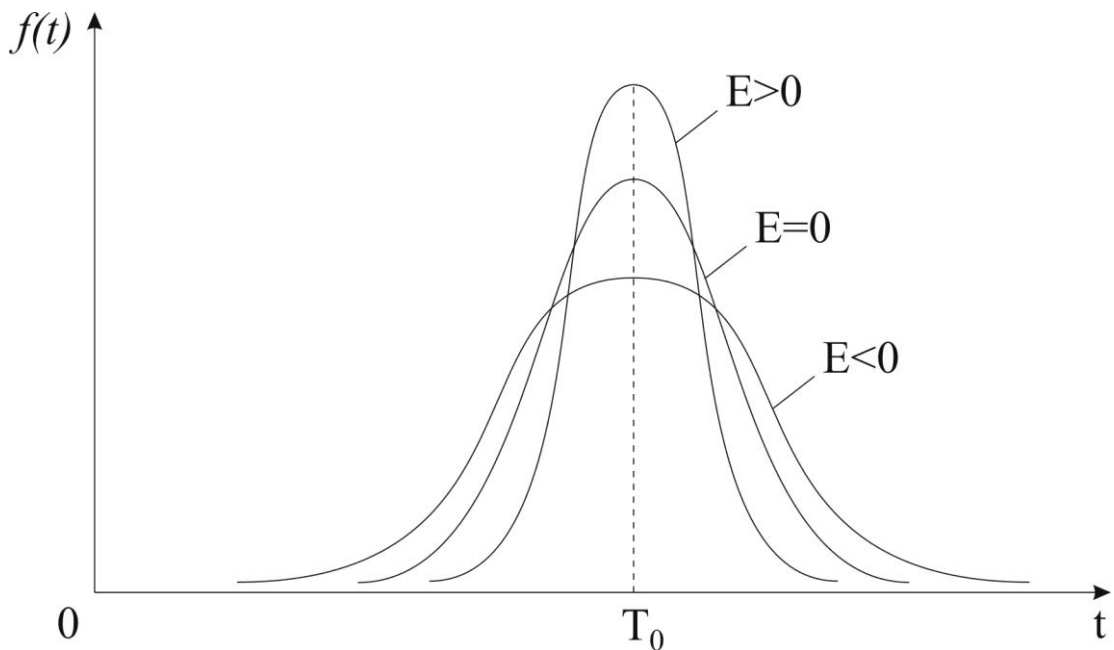


Рисунок 5.27 – Вплив вибіркового ексцесу наробітку до відмови

#### 5.6.4 Вибір закону розподілу випадкової величини наробітку до відмови

Вибір закону розподілу випадкової величини наробітку до відмови полягає в підборі аналітичної функції, яка найкращим чином апроксимує емпіричні функції надійності.

Вибір, значною мірою, – процедура невизначена і багато в чому суб'єктивна; при цьому багато чого залежить від апріорних знань про об'єкт і його властивості, умови роботи, а також від аналізу виду графіків  $P^*(t)$ ,  $f^*(t)$  і  $\lambda^*(t)$ .

Очевидно, що вибір закону розподілу буде залежати, насамперед, від виду емпіричної функції щільності розподілу відмов  $f^*(t)$ , а також від виду  $\lambda^*(t)$ . Таким чином, вибір закону розподілу носить характер прийняття деякої гіпотези.

Припустімо, що обраний гіпотетичний закон розподілу записано за допомогою функції щільності розподілу відмов:

$$f(t) = \psi(t, a, b, c, \dots),$$

де  $a, b, c, \dots$  – невідомі параметри розподілу.

Необхідно підібрати дані параметри так, щоб функція  $f(t)$  найкращим чином згладжувала ступінчастий графік  $f^*(t)$ . При цьому використовується наступний прийом: параметри  $a, b, c, \dots$  вибираються з таким розрахунком, щоб кілька найважливіших числових характеристик теоретичного розподілу були рівні відповідним статистичним оцінкам.

На графіку разом з  $f^*(t)$  будується функція щільності розподілу відмов  $f(t)$ , що дозволяє візуально оцінити результати апроксимації (розбіжності між  $f^*(t)$  і  $f(t)$ ). Оскільки ці розбіжності є неминучими, то виникає питання: чи пояснюються вони випадковими обставинами, чи є пов'язаними з тим, що теоретичний розподіл обрано помилково? Відповідь на це питання може надати розрахунок критерію згоди.

### 5.6.5 Розрахунок критерію згоди

*Критерій згоди* – це критерій перевірки гіпотези про те, що випадкова величина  $T$ , представлена своєю вибіркою, має розподіл передбачуваного типу.

*Перевірка полягає в наступному.* Розраховується критерій як деяка міра розбіжності теоретичного та емпіричного розподілів, причому ця міра є випадковою величиною.

Чим більше міра розбіжності, тим гірше узгодженість емпіричного розподілу з теоретичним, тобто гіпотезу про вибір закону розподілу варто відкинути.

У противному випадку – експериментальні дані не суперечать прийнятому розподілу.

З відомих критеріїв найбільш часто застосовується критерій згоди  $\chi^2$  (хі-квадрат) Пірсона.

Перевірка узгодженості розподілів за критерієм  $\chi^2$  здійснюється наступним чином:

– розраховується критерій  $\chi^2$  (міра розбіжності):

$$\chi^2 = N \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(P_i^* - P_i)^2}{P_i},$$

де  $P_i = f(\tilde{t}_i) \cdot \Delta t$  – теоретична частота (ймовірність) потрапляння випадкової величини в інтервал  $[t_i, t_i + \Delta t]$ ;

– визначається число ступенів волі  $R = k - L$ ,

де  $L$  – кількість незалежних умов, що накладаються на частоти  $P_i^*$ , наприклад:

а) умова  $\sum_{i=1}^k P_i^* = 1$ ;

б) умова збігу  $T_0 = \sum_{i=1}^k \tilde{t}_i \cdot P_i^*$ ;

в) умова збігу  $D = \sum_{i=1}^k (\tilde{t}_i - T_0^*)^2 \cdot P_i^*$  і т.д.

Найчастіше  $L = 3$ . Чим більше число ступенів свободи, тим більше для випадкової величини  $\chi^2$  є характерним розподіл Пірсона;

– за розрахованими  $\chi^2$  і  $R$  визначається ймовірність  $P$  того, що величина, яка має розподіл Пірсона з  $R$  ступенями свободи, перевищить розраховане значення  $\chi^2$ .

Відповідь на питання: наскільки малою повинна бути ймовірність  $P$ , щоб відкинути гіпотезу про вибір того або іншого закону розподілу, – багато в чому є невизначеною.

На практиці, якщо  $P < 0,1$ , то рекомендується підібрати інший закон розподілу.

У цілому, за допомогою критерію згоди можна спростувати обрану гіпотезу. Якщо ж  $P$  є досить великою, то це не може бути доказом правильності гіпотези, а вказує лише на те, що гіпотеза не суперечить даним експерименту.

### Контрольні питання та завдання

1. Дайте визначення поняття «надійність».
2. Перерахуйте та надайте визначення основних станів та подій, якими характеризується надійність.



3. Надати перелік показників надійності невідновлюваних об'єктів.
4. Чим відрізняються статистична та ймовірнісна форма показників безвідмовності об'єкта?
5. Дайте визначення ймовірності безвідмовної роботи об'єкта та поясніть її суть.
6. Дайте визначення щільності розподілу відмов та поясніть її суть при оцінці надійності об'єкта.
7. Дайте визначення інтенсивності відмов.
8. Поясніть суть рівняння зв'язку показників надійності.
9. Дайте визначення статистичної оцінки та ймовірнісної форми середнього наробітку до відмови.
10. З якою метою використовуються математичні моделі надійності?
11. Яким чином впливають математичне очікування та дисперсія на криву щільності розподілу відмов?
12. Наведіть розрахункові формули для показників надійності невідновлюваного об'єкта, наробіток до відмови якого має нормальний розподіл.
13. За яких умов є коректним використання класичного нормального розподілу, і в яких випадках доцільно застосовувати усічений нормальний розподіл?
14. Для опису надійності яких об'єктів використовується експоненціальний закон наробітку до відмови?
15. Який вигляд має щільність розподілу відмов при експоненційному розподілі наробітку до відмови?
16. Наведіть розрахункові формули для показників надійності об'єкта, наробіток до відмови якого має розподіл Релея.
17. За яких умов обирається закон розподілу наробітку до відмови об'єкта?
18. Яким чином формується статистичний ряд за результатами випробувань?
19. Які емпіричні функції розраховуються під час обробки результатів випробувань?
20. Що являє собою критерій згоди?

## ГЛАВА 6. РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

### 6.1 Надійність технічних систем. Загальні поняття та визначення. Надійність основної системи

#### 6.1.1 Основи розрахунку надійності систем. Загальні поняття

*Завдання розрахунку надійності* технічної системи полягає у визначенні показників безвідмовності даної системи, яка складається з невідновлюваних елементів, за даними про надійність елементів і зв'язки між ними.

*Мета розрахунку надійності технічних систем:*

- обґрунтувати вибір конструктивного рішення;
- з'ясувати можливість і доцільність резервування;
- з'ясувати, чи досяжна необхідна надійність при існуючій технології розробки та виробництва.

*Розрахунок надійності технічних систем складається з наступних етапів:*

1. Визначення складу показників надійності, що розраховуються.
2. Складання (синтез) структурно-логічної схеми надійності (структури системи), яка ґрунтується на аналізі функціонування системи (які блоки включені, у чому полягає їх робота, перелік властивостей справної системи і т.п.), та вибір методу розрахунку надійності.
3. Складання математичної моделі, що зв'язує показники надійності системи з показниками надійності її елементів.
4. Виконання розрахунку, аналіз одержаних результатів, коригування розрахункової моделі.

*Розглянемо склад показників надійності для:*

*а) системи з невідновлюваними елементами:*

- ймовірність безвідмовної роботи системи  $P_s(t)$ ;
- щільність розподілу відмов  $f_s(t)$ ;
- інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$ ;
- середній наробіток до відмови  $T_{0s}$ ;

*б) системи з відновлюваними елементами:*

- функція готовності системи  $\Gamma(t)$ ;
- функція простою системи  $\Pi(t)$ ;
- коефіцієнт готовності системи  $k_{z.c.}$ ;
- параметр потоку відмов  $\omega(t)$ ;
- функція потоку відмов  $W(t)$ ;
- середній наробіток між відмовами  $T_0(t)$ .

*Структура системи* – це логічна схема взаємодії елементів, що визначає працездатність системи, або інакше графічне відображення елементів сис-

теми, яке дозволяє однозначно визначити стан системи (працездатний/непрацездатний) за станом (працездатні/непрацездатні) її елементів.

За структурою системи класифікуються наступним чином:

- система без резервування (основна система);
- системи з резервуванням.

Для однієї й тієї ж системи можуть бути складені різні структурні схеми надійності в залежності від виду відмов її елементів.

*Математична модель надійності* – формальні перетворення, що дозволяють одержати розрахункові формули для обчислення показників надійності технічної системи.

Моделі можуть бути реалізовані:

- за допомогою методу інтегральних і диференціальних рівнянь;
- на основі графу можливих станів системи;
- на основі логіко-ймовірнісних методів;
- на основі дедуктивного методу (дерево несправностей).

Найбільш важливим етапом розрахунку надійності є складання структури системи та визначення показників надійності складових її елементів.

По-перше, класифікується поняття (вид) відмов, що істотно впливає на працездатність системи.

По-друге, до складу системи у вигляді окремих елементів можуть входити електричні з'єднання пайкою, стиском або зварюванням, а також інші з'єднання (штепсельні та ін.), оскільки на їхню частку доводиться 10–50 % загальної кількості відмов.

По-третє, є неповна інформація про показники надійності елементів, тому доводиться або інтерполювати показники, або використовувати показники аналогів.

Практично розрахунок надійності здійснюється у декілька етапів:

1. На стадії складання технічного завдання на систему, що проєктується, коли її структура ще не визначена, здійснюється попередня оцінка надійності, виходячи з апріорної інформації про надійність близьких за характером систем і надійність комплектуючих її елементів.

2. Складається структурна схема з показниками надійності елементів, заданими при нормальних (номінальних) умовах експлуатації.

3. Остаточний розрахунок надійності здійснюється на стадії завершення технічного проєкту, коли проведено експлуатацію експериментальних зразків і є відомими всі можливі умови експлуатації. При цьому коригуються показники надійності елементів, часто у бік зменшення, вносяться зміни у структуру системи, обирається резервування.

### 6.1.2 Системи з резервуванням. Загальні поняття

Працездатність технічних систем без резервування вимагає працездатності всіх елементів системи. У складних технічних пристроях без резервування не вдається досягти високої надійності, навіть якщо використовувати елементи з високими показниками безвідмовності. У зв'язку з цим на практиці широке застосування знаходять саме системи з резервуванням.

*Система з резервуванням* – це система з надмірною кількістю елементів, тобто з резервними складовими, що є надлишковими стосовно мінімально необхідної кількості для основної структури і які, при цьому, виконують ті ж самі функції, що й основні елементи.

У системах з резервуванням працездатність забезпечується до тих пір, поки для заміни основних елементів, що відмовили, є в наявності резервні.

*Структурне резервування* може бути:

- загальним (рис. 6.1);
- поелементним (рис. 6.2).

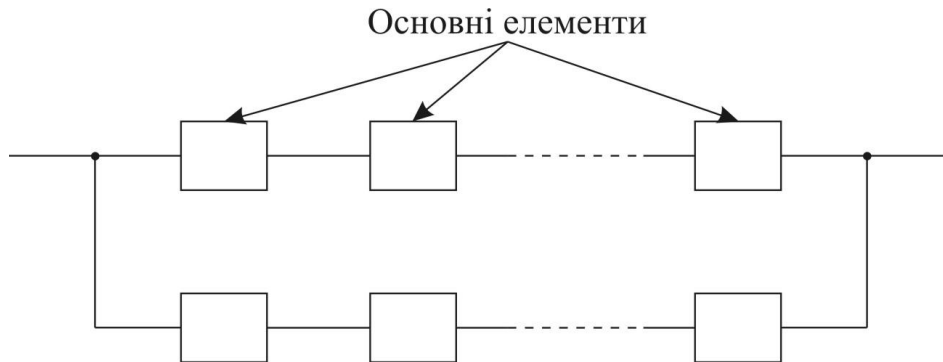


Рисунок 6.1 – Загальне резервування (система резервується в цілому)

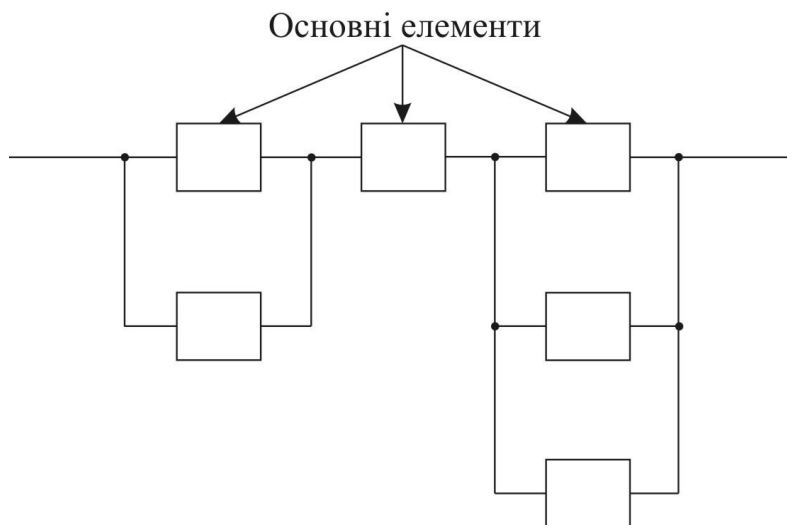


Рисунок 6.2 – Поелементне резервування (резервуються окремі елементи або групи елементів системи)

За видом резервування підрозділяють на:

- пасивне (навантажене) – резервні елементи функціонують нарівні з основними (постійно включені в роботу);
- активне (ненавантажене) – резервні елементи вводяться в роботу тільки після відмови основних елементів (резервування заміщенням).

При навантаженому резервуванні резервні елементи витрачають свій ресурс, тобто інтенсивність відмов основних  $\lambda_o$  та резервних  $\lambda_p$  елементів є однаковою ( $\lambda_o = \lambda_p$ ).

При навантаженому резервуванні розходження між основними та резервними елементами часто умовне. Для забезпечення нормальної роботи (збереження працездатності) необхідно, щоб кількість працездатних елементів не ставало меншим мінімально необхідного.

Різновидом навантаженого резервування є резервування з полегшеним резервом, тобто резервні елементи також перебувають під навантаженням, але меншим, ніж основні. Інтенсивність відмов резервних елементів  $\lambda_p$  нижче, ніж основних  $\lambda_o$ , тобто ( $\lambda_o > \lambda_p$ ).

При ненавантаженому резервуванні резервні елементи не знаходяться під навантаженням, їх показники надійності не змінюються і вони не можуть відмовити при знаходженні в резерві, тобто інтенсивність відмов резервних елементів  $\lambda_p = 0$ .

Приклади ненавантаженого резервування наведені на рис. 6.3.

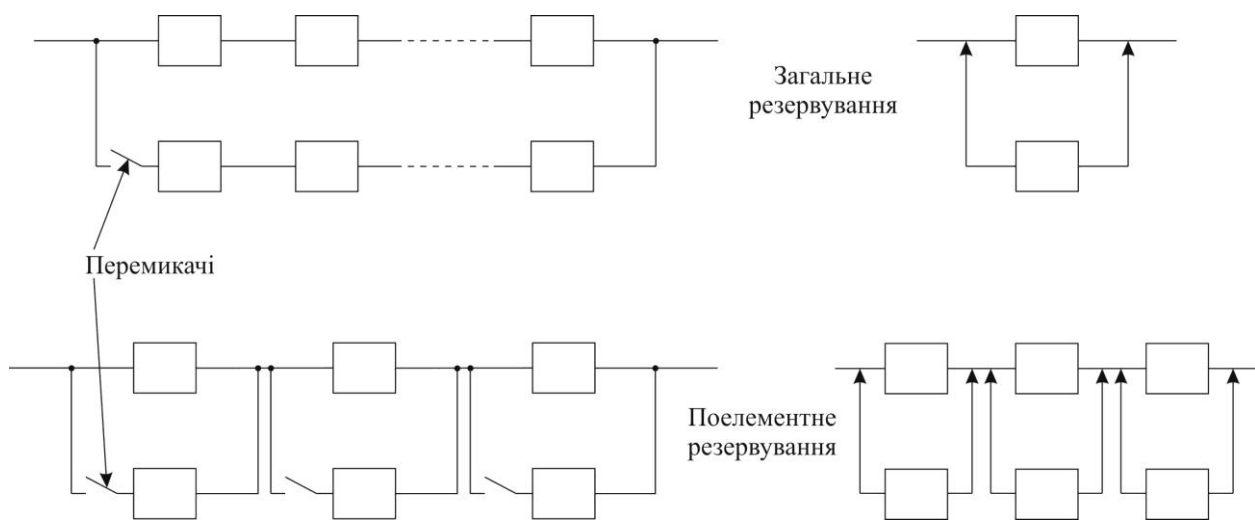


Рисунок 6.3 – Ненавантажене резервування

Резервні елементи включаються в роботу тільки після відмови основних елементів. Перемикання здійснюється вручну або автоматично (автоматично – включення резервних машин і елементів в енергетиці, у бортових мережах літаків і т.д.; вручну – заміна інструмента або оснащення на виробництві і т.д.).

Різновидом ненавантаженого резервування є *ковзне резервування*, коли один і той же резервний елемент може бути використаний для заміни будь-якого з елементів основної системи.

Якщо розглянути два характерних види резервування, що наведені на рис. 6.4, то очевидно, що за рівної кількості основних і резервних елементів ненавантажений резерв забезпечує більшу надійність. Але це справедливо тільки тоді, коли введення резервного елемента в роботу відбувається абсолютно надійно (тобто ймовірність безвідмовної роботи перемикача повинна дорівнювати одиниці). Виконання цієї умови пов'язано зі значними технічними труднощами або є іноді недоцільним з економічних або технічних причин.



Рисунок 6.4 – Характерні види резервувань

Позначимо:

$n$  – кількість однотипних елементів у системі;

$r$  – кількість елементів, необхідних для функціонування системи.

*Кратність резервування* – це співвідношення між загальною кількістю однотипних елементів і елементів, необхідних для роботи системи:

$$k = \frac{n - r}{r}.$$

Кратність резервування може бути цілою, якщо  $r = 1$ , або дробовою, якщо  $r > 1$ .

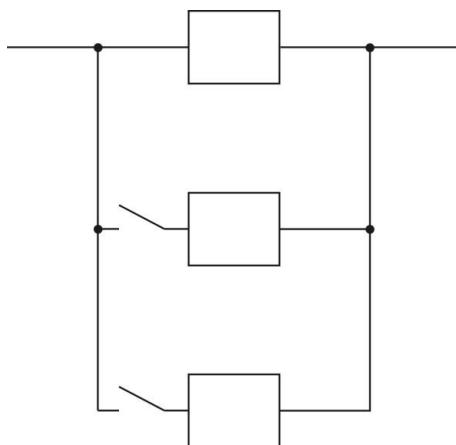


Рисунок 6.5 – Ціла кратність резервування

Для прикладу, що наведений на рис. 6.5:

$$r = 1, k = \frac{3-1}{1} = 2.$$

### 6.1.3 Надійність основної системи

Основні системи є найпростішими технічними системами, в яких відмова одного елемента призводить до відмови всієї системи.

*Працездатність основної системи забезпечується за умови, коли всі  $n$  елементів системи перебувають у працездатному стані.*

Структура системи має вигляд, наведений на рис. 6.6.

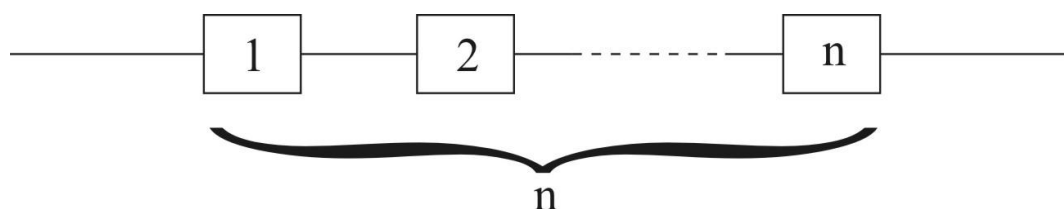


Рисунок 6.6 – Структура основної системи

Випадкова величина наробітку до відмови основної системи може бути визначена наступним чином:

$$T_s = \min \{T_1, T_2, \dots, T_n\} = \min_{i=1, \dots, n} \{T_i\}.$$

Оскільки події, що полягають у працездатності елементів системи, є незалежними, то ймовірність безвідмовної роботи даної системи обчислюється наступним чином:

$$P_s(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t).$$

Ймовірність відмови системи:

$$Q_s(t) = 1 - P_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_i(t).$$

При ідентичних елементах основної системи  $P_1(t) = \dots = P_n(t) = P(t)$  ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює:

$$P_s(t) = P^n(t).$$

Ймовірність відмови системи:

$$Q_s(t) = 1 - P_s(t) = 1 - P^n(t).$$

Оскільки на ділянці нормальної експлуатації наробіток до відмови можна описати експоненційним розподілом кожного елемента  $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ , де  $\lambda_i = \text{const}$ , то ймовірність безвідмовної роботи основної системи визначається за допомогою наступного виразу:

$$P_s(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}.$$

Використовуючи рівняння зв'язку показників безвідмовності

$$P_s(t) = e^{-\int_0^t \lambda_s(t) dt},$$

одержуємо, що інтенсивність відмов основної системи дорівнює сумі інтенсивностей відмов її елементів (при експоненційному законі наробітків до відмови елементів):

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

У загальному випадку, інтенсивність відмов основної системи дорівнює:

$$\lambda_s(t) = \lambda_1(t) + \dots + \lambda_n(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t).$$

Для  $n$  ідентичних елементів  $\lambda_1(t) = \dots = \lambda_n(t) = \lambda(t)$ :

$$\lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda(t) = n\lambda(t).$$



При експоненційному розподілі наробітку до відмови кожного з  $n$  елементів основної системи  $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ , де  $\lambda_i = \text{const}$ , показники безвідмовності основної системи визначаються наступним чином:

	Неідентичні елементи $\lambda_1 \neq \dots \neq \lambda_n$	Ідентичні елементи $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = \lambda$
Ймовірність безвідмовної роботи:	$P_s(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t} = e^{-\lambda_s t};$	$P_s(t) = e^{-n\lambda t};$
Ймовірність відмови:	$Q_s(t) = 1 - P_s(t) = 1 - e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t};$	$Q_s(t) = 1 - P_s(t) = 1 - e^{-n\lambda t};$
Інтенсивність відмов:	$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i;$	$\lambda_s = n\lambda;$
Середній наробіток до відмови:	$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{T_{0i}}};$	$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{n\lambda} = \frac{1}{n} \frac{1}{\lambda} = \frac{T_0}{n};$
Щільність розподілу відмов:	$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = \lambda_s e^{-\lambda_s t};$	$f_s(t) = n\lambda e^{-n\lambda t}.$

Слід відзначити, що вирази для середнього наробітку до відмови основної системи було отримано наступним чином:

$$T_{0s} = \int_0^{\infty} P_s(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_s t} dt = -\frac{1}{\lambda_s} e^{-\lambda_s t} \Big|_0^{\infty} = -\frac{1}{\lambda_s} (e^{-\infty} - e^0) = -\frac{1}{\lambda_s} (0 - 1) = \frac{1}{\lambda_s}.$$

Таким чином, при експоненційному розподілі наробітку до відмови кожного з  $n$  елементів, для розподілу наробітку до відмови основної системи також є характерним експоненційний закон.

Можна зробити висновок, що надійність основної системи завжди менше надійності кожного з її елементів. Зі збільшенням кількості елементів надійність основної системи зменшується.

Наприклад, при  $n = 1000$  і  $P_i(t) = 0,99$ ,  $P_s(t) < 10^{-4}$ , а середній наробіток до відмови системи в 1000 разів менше середнього наробітку до відмови кожного з елементів.

## 6.2 Надійність систем з навантаженим резервуванням

### 6.2.1 Визначення показників надійності системи з навантаженим резервуванням

Розглянемо систему, що складається з одного основного та  $(n - 1)$  резервних елементів (рис. 6.7).

За умови, що відмови елементів є незалежними, відмова системи відбувається тільки в разі відмови всіх  $n$  елементів.

Випадковий наробіток до відмови системи:

$$T_s = \max \{T_1, T_2, \dots, T_n\} = \max_{i=1, \dots, n} \{T_i\}.$$

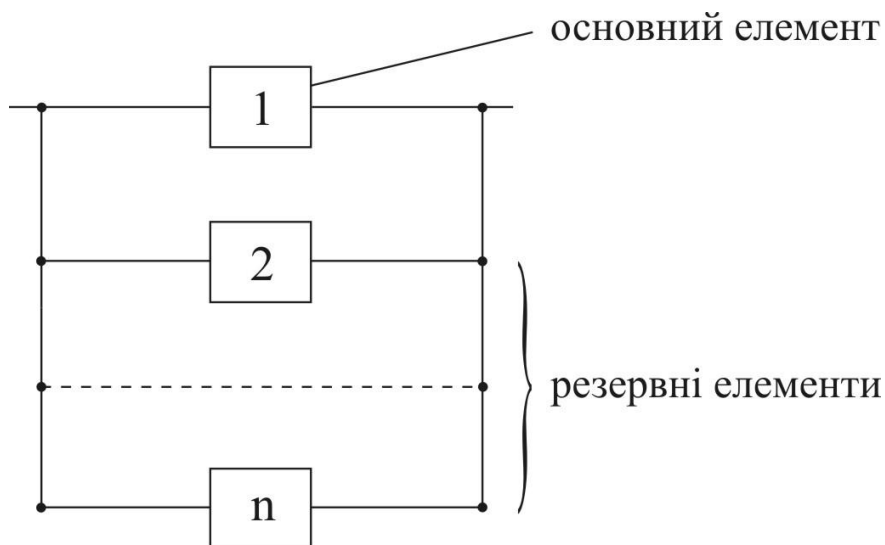


Рисунок 6.7 – Система з навантаженим резервуванням

Система є працездатною до тих пір, поки є працездатним хоча б один її елемент.

Оскільки відмова системи – це подія, що полягає в одночасній відмові всіх елементів, то:

– ймовірність відмови

$$Q_s(t) = Q_1(t) \cdot Q_2(t) \cdot \dots \cdot Q_n(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t));$$

– ймовірність безвідмовної роботи

$$P_s(t) = 1 - Q_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t));$$

– середній наробіток до відмови:

$$T_{0s} = \int_0^{\infty} P_s(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)) \right\} dt.$$

При ідентичних елементах системи, тобто  $P_1(t) = \dots = P_n(t) = P(t)$ :

– ймовірність безвідмовної роботи

$$P_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i(t)) = 1 - (1 - P(t))^n;$$

– ймовірність відмови

$$Q_s(t) = \prod_{i=1}^n Q_i(t) = Q^n(t) = (1 - P(t))^n;$$

– середній наробіток до відмови:

$$T_{0s} = \int_0^{\infty} P_s(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - (1 - P(t))^n \right\} dt.$$

Для системи з експоненційним наробітком до відмови кожного з  $n$  елементів

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

де  $\lambda_i = const$ , показники безвідмовності визначаються наступним чином:

	<i>Неідентичні елементи</i> $\lambda_1 \neq \dots \neq \lambda_n$	<i>Ідентичні елементи</i> $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = \lambda$
Ймовірність безвідмовної роботи:	$P_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t});$	$P_s(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n;$

Ймовірність відмови:	$Q_s(t) = \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t});$	$Q_s(t) = (1 - e^{-\lambda t})^n.$
----------------------	--	------------------------------------

Таким чином, при навантаженому резервуванні експоненційний розподіл наробітку до відмови не зберігається.

При ідентичних  $n$  елементах системи середній наробіток до відмови має вигляд:

$$T_{0s} = \int_0^{\infty} P_s(t) dt = \int_0^{\infty} \left\{ 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n \right\} dt = \left| x = 1 - e^{-\lambda t}, t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{1-x}, dt = \frac{dx}{\lambda(1-x)} \right| =$$

$$= \frac{1}{\lambda} \int_0^1 (1 + x + \dots + x^{n-1}) dx = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = \frac{1}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{n} \right).$$

При неідентичних елементах:

$$T_{0s} = \left( \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_n} \right) - \left( \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \dots + \frac{1}{\lambda_{n-1} + \lambda_n} \right) +$$

$$+ \left( \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} + \dots + \frac{1}{\lambda_{n-2} + \lambda_{n-1} + \lambda_n} \right) + \dots + (-1)^{n+1} \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}.$$

Для системи з  $n$  ідентичними елементами  $P_1(t) = \dots = P_n(t) = P(t)$  вирішуються задачі оптимізації (у різних постановках).

1. Визначення кількості  $n$  елементів системи, при якій ймовірність відмови системи  $Q_s(t)$  не буде перевищувати заданої  $Q_s$ .

Оскільки  $Q_s(t) = Q^n(t)$ , то умова задачі має вигляд:

$$Q^n(t) \leq Q_s.$$

З наведеної нерівності визначається мінімально необхідна кількість елементів системи:

$$n \geq \frac{\ln \frac{1}{Q_s}}{\ln \frac{1}{Q(t)}}.$$

2. Визначення надійності  $n$  елементів системи з умови, щоб імовірність відмови не перевищувала заданої  $Q_s$ .

З умови  $Q^n(t) \leq Q_s$  знаходимо ймовірність відмови  $Q(t)$  і ймовірність безвідмовної роботи  $P(t) \geq 1 - Q(t)$ .

### 6.2.2 Надійність систем з обмеженням по навантаженню

У процесі дослідження роботи деяких систем необхідно, щоб виконувалась наступна умова: для забезпечення працездатності системи щонайменше  $r$  з  $n$  елементів мають бути працездатними. Інакше кажучи, кількість необхідних робочих елементів має дорівнювати  $r$ , а резервних –  $(n - r)$ . Відмова системи настає за умови відмови  $(n - r + 1)$  елементів.

Якщо при зміні кількості елементів, які перебувають у роботі, не спостерігається перевантаження, що впливає на можливість виникнення відмови, то відмови можна вважати незалежними. Ймовірність безвідмовної роботи такої системи визначається за допомогою біноміального розподілу.

Для системи, що зберігає працездатність при функціонуванні  $r$  з  $n$  елементів, ймовірність безвідмовної роботи визначається наступним чином:

$$P_{r|n}(t) = \sum_{i=r}^n C_n^r P_i^r(t) Q_i^{n-r}(t) = \sum_{i=r}^n C_n^r P_i^r(t) (1 - P_i(t))^{n-r},$$

де  $C_n^r = \frac{n!}{r!(n-r)!}$ .

Для ідентичних елементів з експоненційним розподілом наробітку до відмови  $P_i(t) = e^{-\lambda_i t}$ ,  $\lambda_i = \text{const}$  ( $\lambda_1 = \dots = \lambda_i = \dots = \lambda_n = \lambda$ ), ймовірність безвідмовної роботи має вигляд:

$$P_{r|n}(t) = \sum_{i=r}^n C_n^r e^{-\lambda t r} \frac{(1 - e^{-\lambda t})^n}{(1 - e^{-\lambda t})^r}.$$

### 6.2.3 Залежність надійності системи від кратності резервування

За цілої кратності резервування  $k$  ( $r=1, n=k+1$ ) для системи з ідентичними елементами та експоненційним наробітком до відмови:

– ймовірність безвідмовної роботи системи:

$$P_s(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^{k+1};$$

– щільність розподілу відмов системи:

$$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = (k+1)\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^k;$$

– інтенсивність відмов системи:

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{(k+1)\lambda e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t})^k}{1 - (1 - e^{-\lambda t})^{k+1}}.$$

Розглянемо випадок, коли всі елементи системи є високонадійними, тобто  $\lambda t \ll 1$ . Тоді можна отримати спрощені вирази для показників надійності даної системи:

– ймовірність безвідмовної роботи системи:

$$P_s(t) \approx 1 - (\lambda t)^{k+1};$$

– щільність розподілу відмов системи:

$$f_s(t) \approx (k+1)\lambda^{k+1} t^k;$$

– інтенсивність відмов системи:

$$\lambda_s(t) \approx \frac{(k+1)\lambda^{k+1} t^k}{1 - (\lambda t)^{k+1}}.$$

Оскільки  $\lambda t \ll 1$ , то  $(\lambda t)^{k+1} \rightarrow 0$ . У зв'язку з цим інтенсивність відмов системи можна переписати так:

$$\lambda_s(t) \approx (k+1)\lambda^{k+1} t^k = n\lambda^n t^{n-1},$$

де  $n = k + 1$ .

Отриманий вираз для  $\lambda_s(t)$  свідчить про те, що навіть для системи з однакових елементів ( $\lambda = const$ ) інтенсивність відмов залежить від наробітку  $t$ , тобто розподіл наробітку до відмови даної системи не є експоненціальним.

На рис. 6.8 наведено залежності  $P_s(\lambda t)$  і  $\frac{\lambda_s(\lambda t)}{\lambda}$ . Аналіз даних залежностей дозволяє зробити наступні висновки:

– збільшення кратності резервування  $k$  підвищує надійність системи ( $P_s(\lambda t)$  збільшується,  $\lambda_s(\lambda t) / \lambda \rightarrow 0$ );

– резервування є найбільш ефективним на початковій ділянці роботи системи (при  $t \leq T_0$ ), тобто

$$\lim_{t \rightarrow 0} \lambda_s(t) = 0;$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_s(t) = \lambda = \frac{1}{T_0}.$$

Із графіка  $\frac{\lambda_s(\lambda t)}{\lambda}$  видно, що при  $t = (3 \div 4)T_0 = (3 \div 4)\frac{1}{\lambda}$ ,  $\lambda_s$  наближається до  $\lambda$ .

Оскільки середній наробіток до відмови системи при ідентичних елементах ( $\lambda = const$ ):

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{k+1} \frac{1}{i} = \frac{1}{\lambda} \left( 1 + \frac{1}{2} + \dots + \frac{1}{k+1} \right),$$

то вигреш у середньому наробітку знижується при збільшенні кратності резервування.

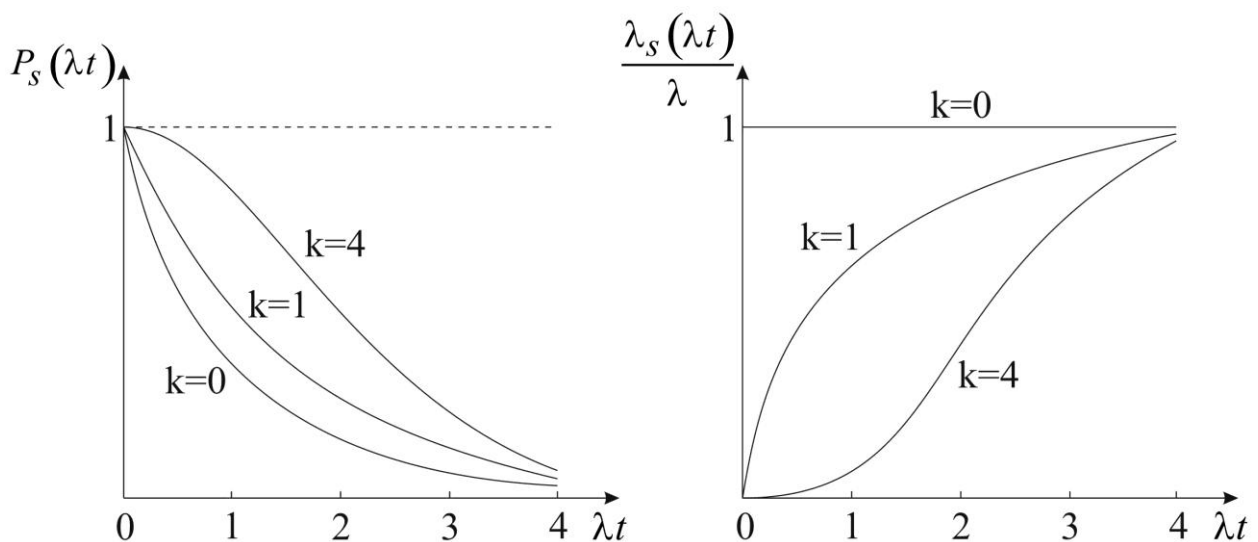


Рисунок 6.8 – Вплив кратності резервування на показники надійності

Наприклад,  
при  $k = 1$

$$T_{0s} = T_0 \left( 1 + \frac{1}{2} \right) = \frac{3}{2} T_0;$$

(збільшення  $T_{0s}$  на 50 %);

при  $k = 2$

$$T_{0s} = T_0 \left( 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \right) = \frac{11}{6} T_0;$$

(збільшення  $T_{0s}$  на 83 %);

при  $k = 3$

$$T_{0s} = \frac{25}{12} T_0;$$

(збільшення  $T_{0s}$  на 108 %).

Таким чином, динаміка зростання  $T_{0s}$  становить: 50, 33 і 25 %, тобто зменшується.

### 6.3 Надійність систем з ненавантаженим резервуванням

#### 6.3.1 Розрахунок показників надійності для систем з ненавантаженим резервуванням

Загальний аналіз надійності наведений для системи, що складається з одного основного (робочого) і  $(n - 1)$  резервних елементів.

*Припущення:*

1. Час заміни елемента, що відмовив, резервним дорівнює 0.
2. Перемикаючий пристрій підключення резервного елемента замість основного, що відмовив, є абсолютно надійним.

При ненавантаженому резервуванні резервний елемент не може відмовити, перебуваючи у відключеному стані, а його показники надійності не змінюються.

*Вихідні дані для розрахунку надійності:*

– ймовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента  $P_i(t)$ ;

– інтенсивність відмов  $i$ -го елемента  $\lambda_i(t)$ ;

– математичне очікування наробітку до відмови  $i$ -го елемента  $T_{0i}$ .

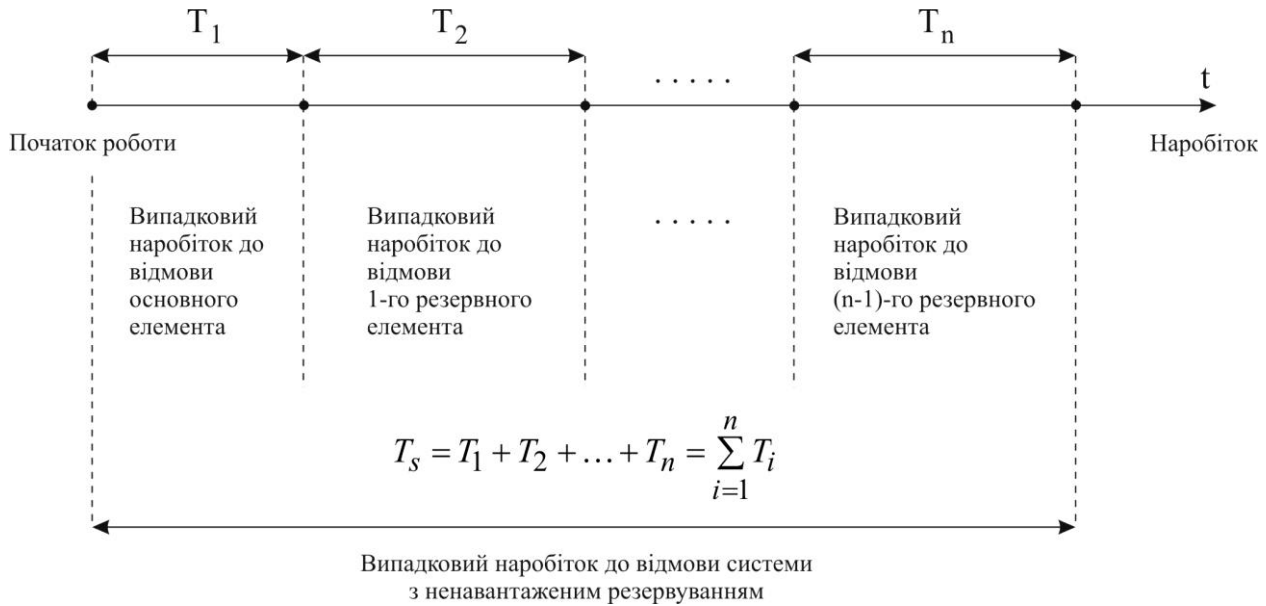
Розглянемо випадковий наробіток до відмови системи з ненавантаженим резервуванням (рис. 6.9).

В даному випадку математичне очікування наробітку до відмови системи має наступний вигляд:



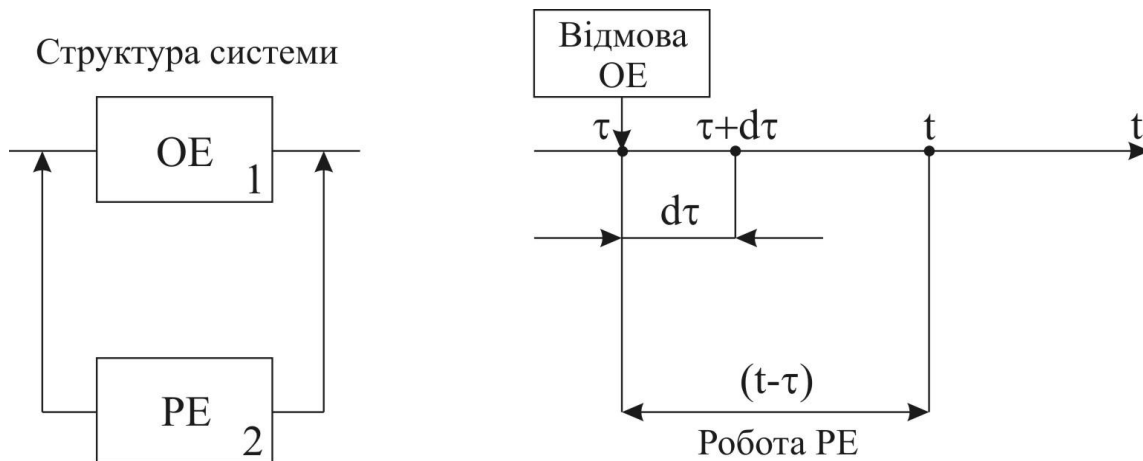
$$T_{0s} = M(T_s) = \sum_{i=1}^n T_{0i} = \sum_{i=1}^n M(T_i),$$

де  $T_{0i} = M(T_i)$  – математичне очікування наробітку до відмови  $i$ -го елемента системи.



**Рисунок 6.9 – Наробіток до відмови системи з ненавантаженим резервуванням**

Розглянемо систему, що складається з основного елемента (ОЕ) та одного резервного (РЕ). Основний та резервний елементи є невідновлюваними об'єктами.



**Рисунок 6.10 – Система з ненавантаженим резервуванням**

Події, що відповідають працездатності системи в інтервалі  $(0, t)$ :

$A$  – безвідмовна робота системи в інтервалі  $(0, t)$ ;

$A_1$  – безвідмовна робота основного елемента в інтервалі  $(0, t)$ ;

$A_2$  – відмова основного елемента в момент часу  $\tau < t$ , включення резервного елемента та його безвідмовна робота протягом  $(t - \tau)$ .

Подія  $A = A_1 \cup A_2$ , тому ймовірність безвідмовної роботи системи в інтервалі  $(0, t)$  визначається наступним чином:

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2),$$

де  $P(A) = P_s(t)$ ;  $P(A_1)$  – ймовірність безвідмовної роботи основного елемента до наробітку  $t$ , тобто  $P(A_1) = P_1(t)$ ;  $P(A_2) = P_p(t)$  – ймовірність відмови основного елемента та безвідмовна робота резервного елемента після відмови основного.

При відомому законі розподілу наробітку до відмови основного елемента обчислення  $P_1(t)$  не становить труднощів.

Подія  $A_2$  є «складною» подією, що включає в себе наступні прості:

$A_{21}$  – відмова основного елемента при  $\tau < t$  (поблизу  $\tau$ );

$A_{22}$  – безвідмовна робота резервного елемента з моменту  $\tau$  до  $t$ , тобто протягом  $(t - \tau)$ .

Подія  $A_2$  полягає в одночасній появі подій  $A_{21}$  і  $A_{22}$ , тобто:

$$A_2 = A_{21} \cap A_{22}.$$

Події  $A_{21}$  і  $A_{22}$  є залежними, тому ймовірність події  $A_2$  має вигляд:

$$P(A_2) = P(A_{21}) \cdot P(A_{22}|A_{21}).$$

Знайдемо відповідні ймовірності:

1)  $P(A_{22}|A_{21}) = P_2(t - \tau)$  – ймовірність безвідмовної роботи резервного елемента протягом  $(t - \tau)$ , причому  $P_2(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи резервного елемента до наробітку  $t$ ;

2) для визначення  $P(A_{21})$  розглянемо інтервал  $(\tau + d\tau)$ , в якому ймовірність відмови основного елемента дорівнює:

$$f_1(\tau) d\tau.$$

Для одержання ймовірності відмови основного елемента в інтервалі  $(0, t)$  необхідно виконати інтегрування вищенаведеного виразу по  $\tau$  від 0 до  $t$ :

$$P(A_{21}) = \int_0^t f_1(\tau) d\tau,$$

де  $f_1(\tau) = -\frac{dP_1(\tau)}{d\tau}$ ,  $P_1(\tau)$  – ймовірність безвідмовної роботи основного елемента до наробітку  $\tau$ ,  $f_1(\tau)$  – щільність розподілу відмов основного елемента при  $\tau$ .

Тоді ймовірність події  $A_2$  дорівнює:

$$P(A_2) = P_p(t) = P(A_{21}) \cdot P(A_{22}|A_{21}) = \int_0^t P_2(t-\tau) f_1(\tau) d\tau.$$

Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи розглянутої системи з ненавантаженим резервуванням дорівнює:

$$P_s(t) = P_1(t) + \int_0^t P_2(t-\tau) f_1(\tau) d\tau. \quad (6.1)$$

Аналогічно, для системи з одним основним та  $(n-1)$  резервними елементами одержимо наступний рекурентний вираз:

$$P_s(t) = P_{n-1}(t) + \int_0^t P_n(t-\tau) f_{n-1}(\tau) d\tau, \quad (6.2)$$

де індекс  $(n-1)$  означає, що відповідні характеристики (ймовірність безвідмовної роботи та щільність розподілу відмов) відносяться до системи, в якій включається в роботу останній  $n$ -й елемент.

Вираз (6.2) наведений для стану, коли до моменту  $\tau$  відмовив передостанній  $(n-1)$  елемент системи, та залишився лише один (останній) працездатний елемент.

Нехай для системи, що наведена на рис. 6.10, наробіток до відмови як основного, так і резервного елементів, має експоненційний розподіл з параметрами, відповідно,  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$ :

$$P_1(t) = e^{-\lambda_1 t}, \quad P_2(t) = e^{-\lambda_2 t}.$$

Тоді вираз (6.1) після інтегрування має вигляд:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_1 t} + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \quad (6.3)$$

Щільність розподілу наробітку до відмови системи дорівнює:

$$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \quad (6.4)$$

При кратності резервування  $k > 5$  розподіл наробітку до відмови системи з ненавантаженим резервом стає близьким до нормального, незалежно від законів розподілу наробітку до відмови елементів, що входять до системи.

При ідентичних основному та  $(n-1)$  резервних елементах, а також експоненційному розподілі наробітку до відмови всіх елементів, ймовірність безвідмовної роботи системи з ненавантаженим резервом і цілою кратністю резервування  $k = \frac{n-r}{r}$ , де  $r=1$ :

$$P_s(t) = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^j}{j!} = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^k \frac{(\lambda t)^j}{j!}, \quad (6.5)$$

де  $n$  – кількість елементів системи;  $k = \frac{n-1}{1} = n-1$  – кратність резервування, при  $r=1$ .

Щільність розподілу відмов системи:

$$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = \frac{\lambda^n t^{n-1}}{(n-1)!} e^{-\lambda t}. \quad (6.6)$$

Інтенсивність відмов системи:

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{\lambda^n t^{n-1}}{(n-1)! \sum_{j=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^j}{j!}}. \quad (6.7)$$

Середній наробіток до відмови системи:

$$T_{0s} = \frac{n}{\lambda}. \quad (6.8)$$

Таким чином, наробіток до відмови таких систем має розподіл Ерланга (гамма-розподіл при цілих  $n$ ).

### 6.3.2 Вплив кратності резервування на надійність системи з ненавантаженим резервуванням

Відповідно до виразу (6.5) проаналізуємо, як змінюється ймовірність безвідмовної роботи системи за різної кратності резервування:

$$k = 0; n = 1; P_s(t) = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^0 \frac{(\lambda t)^j}{j!} = e^{-\lambda t};$$

$$k = 1; n = 2; P_s(t) = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^1 \frac{(\lambda t)^j}{j!} = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t);$$

$$k = 2; n = 3; P_s(t) = e^{-\lambda t} \sum_{j=0}^2 \frac{(\lambda t)^j}{j!} = e^{-\lambda t} \left( 1 + \lambda t + \frac{\lambda^2 t^2}{2} \right).$$

Порівняння ненавантаженого та навантаженого резервувань проведено за допомогою графіка  $P_s(\lambda t)$  для системи з ідентичними елементами і кратністю резервування  $k = 2$  (рис. 6.11).

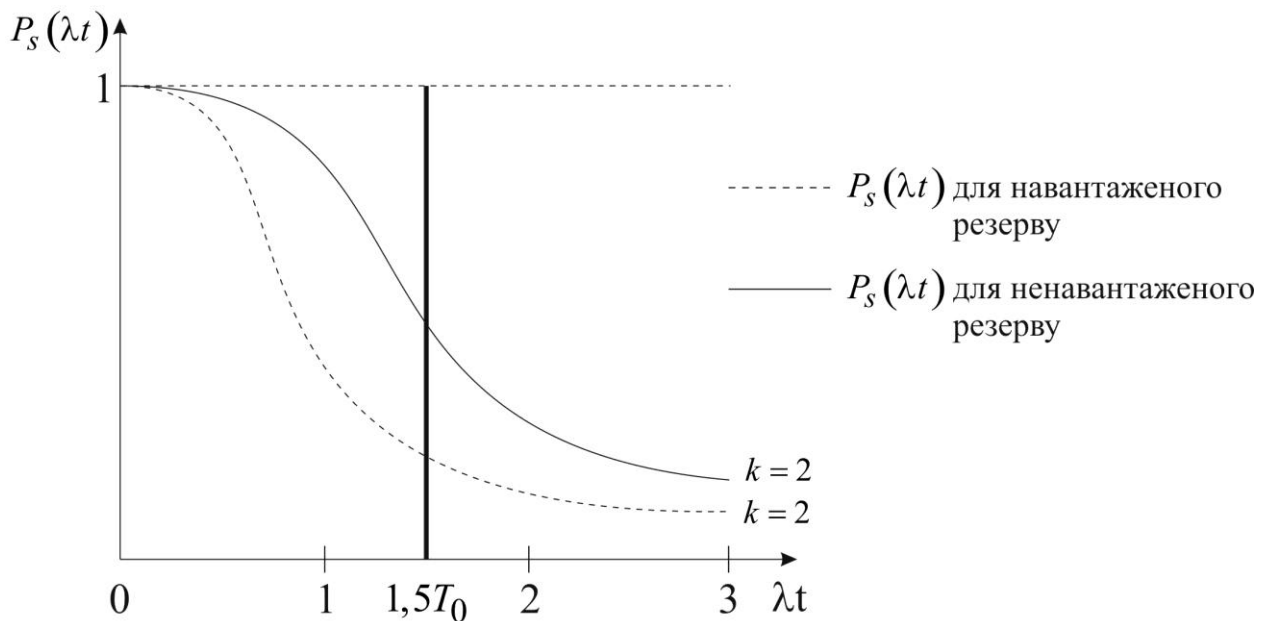


Рисунок 6.11 – Порівняння навантаженого та ненавантаженого резервувань

Очевидно, що найбільша ефективність від використання системи з ненавантаженим резервом досягається при тривалості роботи резервного елемента не менш ніж  $1,5T_0$ .

При ненавантаженому резервуванні із дробовою кратністю (при  $r > 1$ ) та експоненційному розподілі наробітку до відмови ідентичних елементів системи розрахунковий вираз для  $P_s(t)$  має вигляд:

$$P_s(t) = e^{-r\lambda t} \sum_{j=0}^{k^*} \frac{(r\lambda t)^j}{j!},$$

де  $k^* = n - r$ .

## 6.4 Надійність систем з полегшеним та ковзним резервом

### 6.4.1 Надійність систем з полегшеним резервом

Як відзначалося в попередньому пункті, ненавантажений резерв є більш ефективним, ніж навантажений, і кількісно показники ефективності залежать від законів розподілу наробітку до відмови окремих елементів резервованої системи.

Основним моментом, що може позначитися на оцінці надійності, є те, що припущення  $\lambda = const$  досить умовне, оскільки, особливо за відсутності технічного обслуговування, черговий працюючий елемент експлуатується до повного зношування (фізично  $\lambda$  повинна зростати). Тому прийнятий експоненційний розподіл наробітку до відмови елементів, що переходять із резервного у робочий стан, використовувався лише з метою спрощення розрахунків.

Ненавантажений резерв у рамках прийнятих припущень не завжди може бути реалізованим. Наприклад, в авіа- і суднових системах як на основні, так і на резервні елементи діє вібрація, удари, перепади температур і т.п. Інакше кажучи, не включені в роботу резервні елементи будуть мати деяку  $\lambda \neq 0$ , тобто вони також зношуються, але менш інтенсивно.

Таким чином, у ряді практичних випадків доречно застосовувати полегшений резерв:

- підключення резервних елементів до ланцюгів живлення для прогріву та утримання необхідних значень параметрів;
- зовнішні навантаження та впливи, що призводять до зміни властивостей матеріалів, робочих параметрів і т.п.

При цьому резервні елементи будуть мати деяку інтенсивність відмов  $\lambda_p \neq 0$ .

Розглянемо систему, що складається з рівнонадійних основного та резервного (РЕ) елементів, причому зазначені елементи є невідновлюваними.

Події, що забезпечують безвідмовну роботу системи в інтервалі  $(0, t)$ :

$A$  – безвідмовна робота системи в інтервалі  $(0, t)$ ;

$A_1$  – безвідмовна робота основного елемента в інтервалі  $(0, t)$ ;

$A_2$  – відмова основного елемента в момент часу  $\tau < t$ , включення резервного елемента та його безвідмовна робота протягом  $(t - \tau)$ .

Подія  $A$  являє собою суму (об'єднання) подій  $A_1$  і  $A_2$ :

$$A = A_1 \cup A_2.$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи в інтервалі  $(0, t)$  дорівнює сумі ймовірностей подій  $A_1$  і  $A_2$ :

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2),$$

де  $P(A) = P_s(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи системи до наробітку  $t$ ;  $P(A_1) = P_o(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи основного елемента до наробітку  $t$ ;  $P(A_2) = P_p(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи резервного елемента до наробітку  $t$  за умови, що основний елемент відмовив.

При відомому законі розподілу наробітку до відмови основного елемента обчислення  $P_o(t)$  не викликає труднощів. Розглянемо докладніше визначення  $P_p(t)$ . Для цього подію  $A_2$  розкладемо на складові:

$A_{21}$  – відмова основного елемента при  $\tau < t$ ;

$A_{22}$  – безвідмовна робота резервного елемента до наробітку  $\tau$  (до моменту заміни ним основного елемента);

$A_{23}$  – безвідмовна робота резервного елемента з моменту  $\tau$  до  $t$ , тобто протягом  $(t - \tau)$ .

Очевидно, що подія  $A_2$  полягає в одночасній появі всіх подій:

$$A_2 = A_{21} \cap A_{22} \cap A_{23}.$$

Події  $A_{21}$ ,  $A_{22}$ ,  $A_{23}$  є залежними, але, оскільки вони представляють собою ймовірності безвідмовної роботи або ймовірності відмови елементів, наробітки до відмови яких описуються своїми законами розподілу, то ймовірність події  $A_2$  дорівнює добутку ймовірностей подій:

$$P(A_2) = P(A_{21}) \cdot P(A_{22}) \cdot P(A_{23}).$$

Для визначення відповідних ймовірностей застосуємо наступний підхід.

Перш за все, розглянемо нескінченно малий інтервал  $[\tau; \tau + d\tau]$  і запишемо вираз для ймовірності відмови основного елемента в даному інтервалі:

$$f_o(\tau) d\tau,$$

де  $f_o(\tau) = -\frac{dP_o(\tau)}{d\tau}$  – щільність розподілу відмов основного елемента.

Ймовірність безвідмовної роботи резервного елемента до моменту відмови основного елемента дорівнює:

$$P_p(\tau) = P(A_{22}).$$

Ймовірність безвідмовної роботи резервного елемента від моменту включення його в роботу  $\tau$  до  $t$ :

$$P_p(t - \tau) = P(A_{23}).$$

Тоді ймовірність безвідмовної роботи системи протягом наробітку  $[\tau; \tau + d\tau]$  за умови, що основний елемент відмовив, дорівнює:

$$P_p(\tau) \cdot P_p(t - \tau) \cdot f_o(\tau) d\tau.$$

Отриманий вираз не дорівнює  $P(A_2)$ , оскільки являє собою ймовірність безвідмовної роботи системи за виділений нескінченно малий інтервал наробітку поблизу  $\tau$ . Для одержання  $P(A_2)$  необхідно здійснити інтегрування вищенаведеного виразу від 0 до  $t$ :

$$P(A_2) = P_p(t) = \int_0^t P_p(\tau) \cdot P_p(t - \tau) \cdot f_o(\tau) d\tau.$$

Таким чином, ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи з полегшеним резервом, що складається з двох рівнонадійних елементів, дорівнює:

$$P_s(t) = P_o(t) + \int_0^t P_p(\tau) \cdot P_p(t - \tau) \cdot f_o(\tau) d\tau. \quad (6.9)$$

Аналогічно, ймовірність безвідмовної роботи системи, що складається з  $n$  рівнонадійних елементів:

$$P_s(t) = P_{(n-1)s}(t) + \int_0^t P_n(\tau) \cdot P_n(t - \tau) \cdot f_{(n-1)s}(\tau) d\tau,$$

де індекс  $(n-1)s$  означає, що ймовірність безвідмовної роботи та щільність розподілу відмов відносяться до системи, при відмові якої включається в роботу  $n$ -й елемент.



При експоненційному розподілі наробітку до відмови елементів системи, складові розрахункового виразу (6.9) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} P_p(\tau) &= e^{-\lambda_p \tau}; \\ P_p(t-\tau) &= e^{-\lambda_o(t-\tau)}; \\ P_o(t) &= e^{-\lambda_o t}; \\ f_o(\tau) &= \lambda_o e^{-\lambda_o \tau}, \end{aligned}$$

де  $\lambda_o$  – інтенсивність відмов елементів у робочому режимі;  $\lambda_p$  – інтенсивність відмов елементів у режимі резерву.

За наявності одного основного та одного резервного елемента ( $n=2$ ), ймовірність безвідмовної роботи визначається:

$$\begin{aligned} P_s(t) &= P_o(t) + \int_0^t P_p(\tau) \cdot P_p(t-\tau) \cdot f_o(\tau) d\tau = \\ &= e^{-\lambda_o t} + \int_0^t e^{-\lambda_p \tau} \cdot e^{-\lambda_o(t-\tau)} \cdot \lambda_o e^{-\lambda_o \tau} d\tau, \end{aligned}$$

остаточно:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_o t} \left[ 1 + \frac{\lambda_o}{\lambda_p} \left( 1 - e^{-\lambda_p t} \right) \right].$$

Для системи з  $n$  елементів та експоненційним розподілом наробітку до відмови:

$$P_s(t) = P_{(n-1)s}(t) + \frac{C_{n-1}(t)}{(n-1)!} e^{-\lambda_o t} \left[ 1 - e^{-\lambda_p t} \right]^{n-1},$$

де  $C_{n-1}(t) = \prod_{j=0}^{n-2} \left( j + \frac{\lambda_o}{\lambda_p} \right)$

Розрахунки для систем з полегшеним резервом мають об'єктивні труднощі, оскільки дуже важко врахувати зовнішній вплив на характеристики надійності, тобто визначити  $\lambda_p$ .

Середній наробіток до відмови системи з  $n$  елементів має вигляд:

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_o} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{1}{1 + j \frac{\lambda_p}{\lambda_o}}.$$

При практичних розрахунках надійності систем з полегшеним резервуванням у випадку, коли ймовірність безвідмовної роботи основного елемента дорівнює  $P_o(t) = e^{-\lambda_o t}$ , а резервні елементи є ідентичними з  $P_p(t) = e^{-\lambda_p t}$  (для  $(n-1)$  резервних елементів), то ймовірність безвідмовної роботи система може бути визначена за допомогою наступного виразу:

$$P_s(t) \approx 1 - \frac{t \cdot \prod_{i=1}^n [\lambda_o + (i-1)\lambda_p]}{n!},$$

де  $n$  – загальна кількість елементів системи.

Наприклад, при  $n = 2$  ( $k = 1, r = 1$ ):

$$P_s(t) \approx 1 - \frac{t \cdot \lambda_o (\lambda_o + \lambda_p)}{2!};$$

при  $n = 3$  ( $k = 2, r = 1$ ):

$$P_s(t) \approx 1 - \frac{t \cdot \lambda_o (\lambda_o + \lambda_p) (\lambda_o + 2\lambda_p)}{3!}.$$

#### 6.4.2 Надійність систем з ковзним резервом

Особливістю ковзного резервування є те, що резервний елемент може замінити будь-який елемент основної системи, що відмовив.

Структура системи з ковзним резервуванням наведена на рис. 6.12.

Основна система складається з  $n$  елементів. Резервна група – з  $m$  елементів. Як правило,  $m < n$ , тобто кількість резервних елементів є меншою за кількість основних, тому ковзне резервування вважається *активним із дробовою кратністю*.

Відмова системи настає у випадку, коли кількість основних елементів, що відмовили, перевищує кількість резервних елементів.

Розглянемо випадок визначення ймовірності безвідмовної роботи системи з одним резервним елементом на  $n$  елементів основної системи (рис. 6.13).

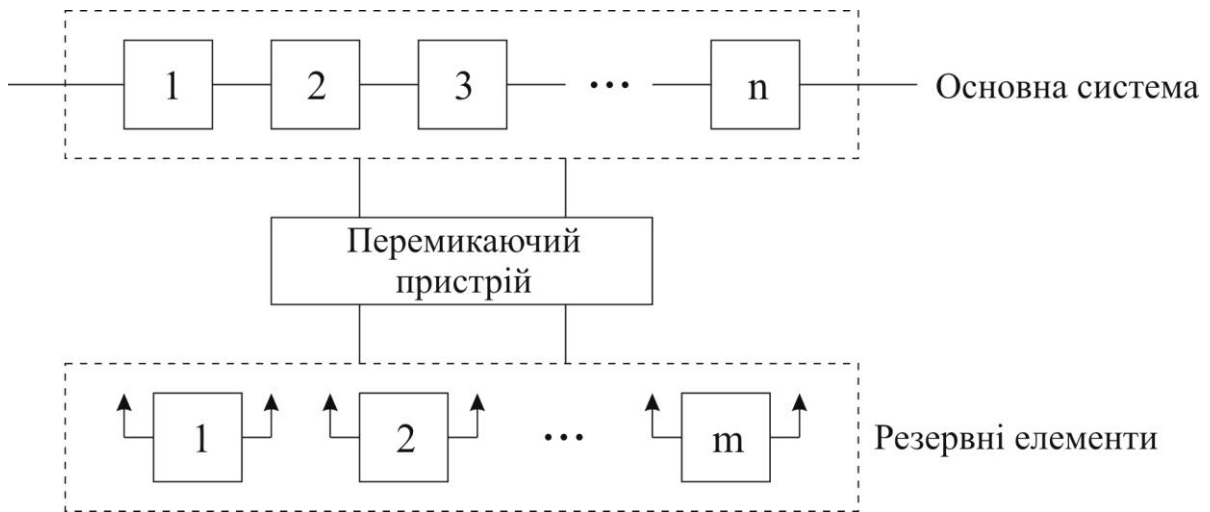


Рисунок 6.12 – Структура ковзного резервування

*Припущення:* резервний елемент та елементи основної системи є рівнонадійними, причому резервний елемент не може відмовити до моменту його включення в роботу.

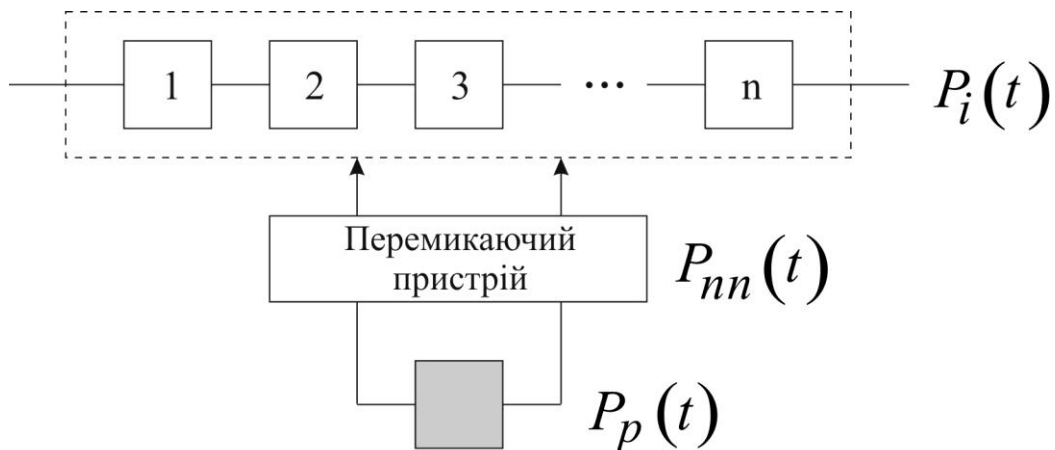


Рисунок 6.13 – Ковзне резервування з одним резервним елементом

Нехай задано:

- ймовірності безвідмовної роботи елементів основної системи  $P_i(t) = P(t)$ ;
- ймовірність безвідмовної роботи перемикаючого пристрою  $P_{nn}(t)$ ;
- ймовірність безвідмовної роботи резервного елемента  $P_p(t)$ .

Щоб одержати розрахунковий вираз для ймовірності безвідмовної роботи системи застосуємо підхід, що був розглянутий для системи з полегшеним резервуванням:

- виділимо можливі стани системи, при яких вона продовжує безвідмовно працювати;
- обчислимо ймовірності даних станів.

Розглянемо події, що забезпечують безвідмовну роботу системи в інтервалі  $(0, t)$ :

$A$  – безвідмовна робота системи в інтервалі  $(0, t)$ ;

$A_1$  – безвідмовна робота всіх елементів основної системи в інтервалі  $(0, t)$ ;

$A_2$  – відмова одного основного елемента в момент часу  $\tau < t$ , перемикаючий пристрій є працездатним на момент часу  $\tau$ , включення резервного елемента та його безвідмовна робота протягом  $(t - \tau)$ .

Подія  $A$  виконується в результаті виконання однієї з подій  $A_1$  або  $A_2$ :

$$A = A_1 \cup A_2.$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи в інтервалі  $(0, t)$  дорівнює:

$$P(A) = P(A_1) + P(A_2),$$

де  $P(A) = P_s(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи системи до наробітку  $t$ ;

$P(A_1) = P_1(t) = P^n(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи основної системи до наробітку  $t$ ;  $P(A_2) = P_2(t)$  – ймовірність появи події  $A_2$ .

Для визначення ймовірності  $P(A_2)$  розглянемо складові події  $A_2$ :

$A_{21}^1$  – відмова одного (першого) з  $n$  елементів основної системи при  $\tau < t$ ;

$A_{22}^1$  – безвідмовна робота перемикаючого пристрою до наробітку  $\tau$  – моменту включення резервного елемента;

$A_{23}^1$  – безвідмовна робота резервного елемента з моменту  $\tau$  до  $t$ , тобто протягом  $(t - \tau)$ .

Очевидно, що

$$A_2^1 = A_{21}^1 \cap A_{22}^1 \cap A_{23}^1,$$

тому

$$P(A_2^1) = P(A_{21}^1) \cdot P(A_{22}^1) \cdot P(A_{23}^1).$$

Індекс «1» означає, що вищенаведені вирази записані для випадку відмови 1-го елемента основної системи.

Визначимо відповідні ймовірності:

1. Ймовірність  $P(A_{21}^1)$ . Розглянемо нескінченно малий інтервал  $[\tau, \tau + d\tau]$  і запишемо ймовірність відмови основного елемента в даному інтервалі:

$$f(\tau)d\tau,$$

де  $f(\tau) = -\frac{dP(\tau)}{d\tau}$  – щільність розподілу відмов основного елемента.

2. Ймовірність  $P(A_{22}^1)$ . Ймовірність безвідмовної роботи перемикаючого пристрою до моменту відмови одного з елементів основної системи дорівнює:

$$P(A_{22}^1) = P_{nn}(\tau).$$

3. Ймовірність  $P(A_{23}^1)$ . Ймовірність безвідмовної роботи резервного елемента протягом  $(t - \tau)$  дорівнює:

$$P(A_{23}^1) = P_p(t - \tau).$$

Таким чином, імовірність безвідмовної роботи системи в інтервалі  $[\tau, \tau + d\tau]$  при відмові першого елемента основної системи може бути записана наступним чином:

$$f(\tau)d\tau \cdot P_{nn}(\tau) \cdot P_p(t - \tau).$$

Інтегруючи даний вираз по всіх  $\tau$  від 0 до  $t$ , визначається ймовірність безвідмовної роботи системи за умови, що перший з елементів основної системи відмовив:

$$P(A_2^1) = \int_0^t f(\tau) \cdot P_{nn}(\tau) \cdot P_p(t - \tau) d\tau.$$

Аналогічні вирази можна отримати для випадків, коли відмовити може будь-який з  $n$  елементів основної системи. Разом з тим, після відмови одного з елементів основної системи, інші  $n - 1$  елементів повинні залишитися працездатними.

Оскільки подія  $A_2$  може виникнути в разі відмови будь-якого з  $n$  елементів основної системи, то її можна представити наступним чином:

$$A_2 = \sum_{i=1}^n A^{n-1} \cap A_2^i,$$

де  $A_2^i$  – безвідмовна робота системи в разі відмови  $i$ -го (не тільки першого) елемента основної системи;  $A^{n-1}$  – подія, що полягає в безвідмовній роботі решти елементів основної системи.

Ймовірність появи події  $A_2$ :

$$P(A_2) = P\left\{ \sum_{i=1}^n A^{n-1} \cdot A_2^i \right\} = \sum_{i=1}^n P(A^{n-1}) \cdot P(A_2^i),$$

де  $P(A^{n-1}) = P^{n-1}(t)$ .

Таким чином, імовірність безвідмовної роботи системи при відмові будь-якого з  $n$  елементів основної системи має вигляд:

$$\begin{aligned} P(A_2) = P_2(t) &= \sum_{i=1}^n P^{n-1}(t) \cdot \int_0^t f(\tau) \cdot P_{nn}(\tau) \cdot P_p(t-\tau) d\tau = \\ &= n \cdot P^{n-1}(t) \cdot \int_0^t f(\tau) \cdot P_{nn}(\tau) \cdot P_p(t-\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Тоді ймовірність безвідмовної роботи системи з ковзним резервуванням визначається:

$$P_s(t) = P_1(t) + P_2(t) = P^{n-1}(t) \left[ P(t) + n \cdot \int_0^t f(\tau) \cdot P_{nn}(\tau) \cdot P_p(t-\tau) d\tau \right].$$

При експоненційному розподілі наробітку до відмови основних і резервного елементів  $P(t) = e^{-\lambda t}$ , а також перемикаючого пристрою, ймовірність безвідмовної роботи системи має вигляд:

$$P_s(t) = \left[ 1 + n \frac{\lambda}{\lambda_{nn}} (1 - e^{-\lambda_{nn} t}) \right] e^{-n\lambda t},$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов основних та резервного елементів;  $\lambda_{nn}$  – інтенсивність відмов перемикаючого пристрою.

Показник ефективності резервування може бути обчислений за наступною формулою:

$$E = \frac{P_s(t)}{P_0(t)} = 1 + n \frac{\lambda}{\lambda_{mn}} \left(1 - e^{-\lambda_{mn}t}\right),$$

де  $P_0(t) = e^{-n\lambda t}$  – ймовірність безвідмовної роботи основної системи.

За збільшення кількості резервних елементів ( $m > 1$ ) для визначення ймовірності безвідмовної роботи системи з ковзним резервуванням  $P_s(t)$  розглядаються, відповідно, чотири несумісних події (для  $m = 2$ ), при яких можлива безвідмовна робота системи і т.д.

## 6.5 Схеми для розрахунку показників надійності технічних систем

### 6.5.1 Метод спрощення схеми (мережі)

Указаний метод відноситься до найпростіших методів оцінки надійності системи, що складається з підсистем послідовно та паралельно з'єднаних елементів. Поступово об'єднуючи та зменшуючи кількість послідовних та паралельних підсистем, можна привести складну систему до гіпотетичної одиниці. Головна перевага даного підходу полягає у тому, що він є простим у розумінні та може легко застосовуватись. Продемонструємо зазначений метод на наступному прикладі.

*Приклад.* Схема на рис. 6.14 являє собою систему з незалежними елементами – кожен блок є окремим елементом. Задано ймовірності безвідмовної роботи для кожного елемента  $P_i$ ,  $i = 1, \dots, 5$ . Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи, використовуючи метод спрощення схеми.

Перш за все, виділимо підсистеми  $A$ ,  $B$  і  $C$  так, як це наведено на рис. 6.14 а. Підсистема  $A$  включає елементи 1 і 2, що з'єднані послідовно. Замінюємо їх одним гіпотетичним елементом, ймовірність безвідмовної роботи якого:

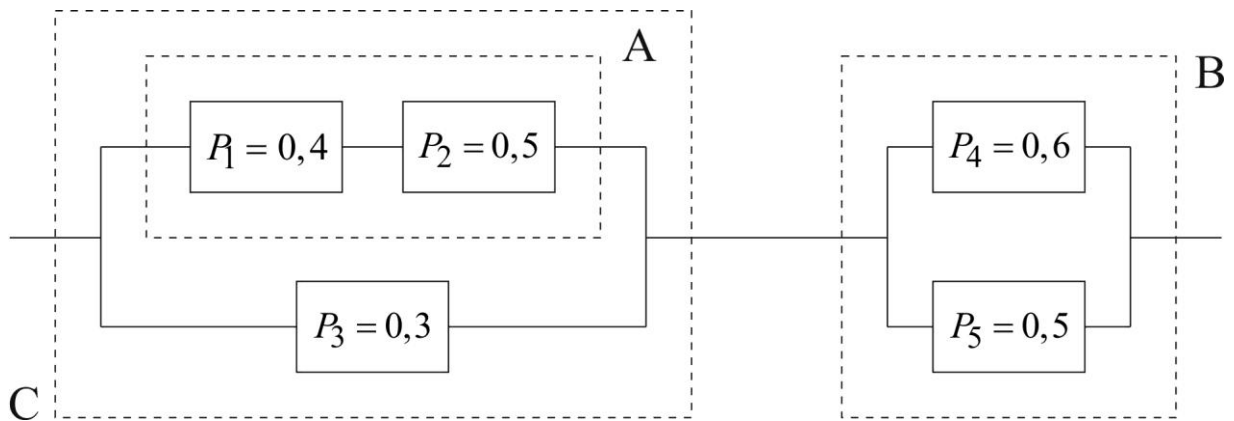
$$P_A = P_1 \cdot P_2 = 0,4 \cdot 0,5 = 0,2.$$

Таким чином, підсистема  $A$  спрощується до єдиного гіпотетичного елемента, ймовірність безвідмовної роботи якого дорівнює 0,2. Спрощена схема наведена на рис. 6.14 б. Ліва частина системи містить два елементи:  $A$  і 3, що з'єднані паралельно. Спростимо підсистему  $C$  зведенням її до одного гіпотетичного елемента наступним чином:

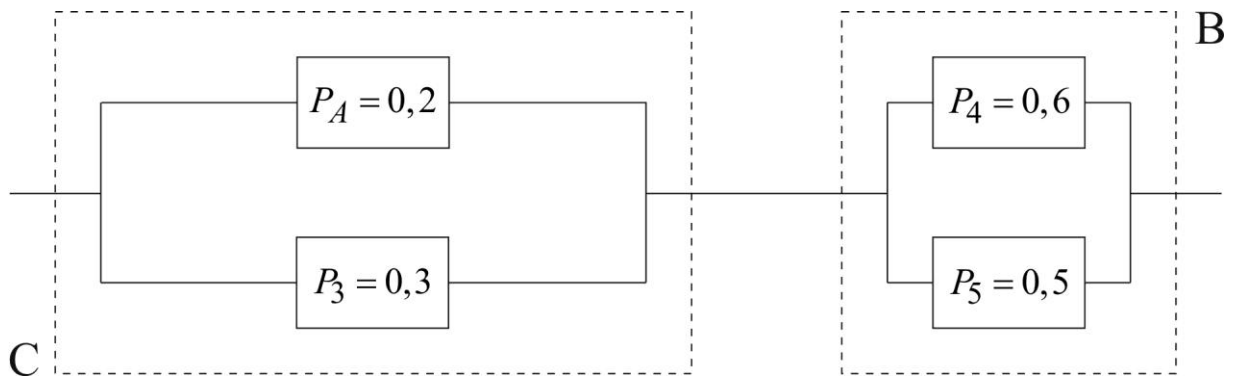
$$P_C = 1 - (1 - P_A)(1 - P_3) = 1 - (1 - 0,2)(1 - 0,3) = 0,44.$$

Аналогічно спростимо підсистему  $B$ :

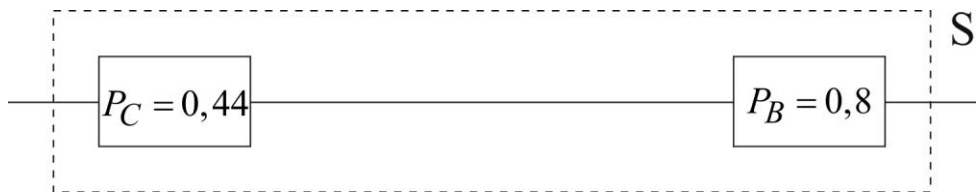
$$P_B = 1 - (1 - P_4)(1 - P_5) = 1 - (1 - 0,6)(1 - 0,5) = 0,8.$$



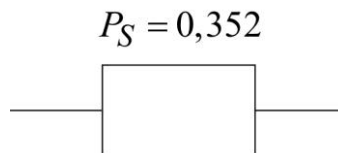
а)



б)



в)



г)

Рисунок 6.14 – Приклад спрощення схеми

Відповідна спрощена схема наведена на рис. 6.14 в.



Таким чином, систему спрощено до двох гіпотетичних елементів  $B$  і  $C$ , що з'єднані послідовно. Ймовірність безвідмовної роботи даної системи  $S$  визначається наступним чином:

$$P_S = P_B \cdot P_C = 0,8 \cdot 0,44 = 0,352.$$

Таким чином, система з п'яти елементів спрощена до одного гіпотетичного елемента з імовірністю безвідмовної роботи  $P_S$ , що дорівнює ймовірності безвідмовної роботи вихідної системи.

### 6.5.2 Метод перетворення з'єднання трикутником у з'єднання зіркою

Розглянемо, наприклад, три елементи системи з імовірностями безвідмовної роботи  $P_{AB}$ ,  $P_{BC}$  і  $P_{AC}$ , що з'єднані трикутником (рис. 6.15). Дана конфігурація є еквівалентною з'єднанню зіркою елементів з імовірностями безвідмовної роботи  $P_A$ ,  $P_B$  і  $P_C$ .

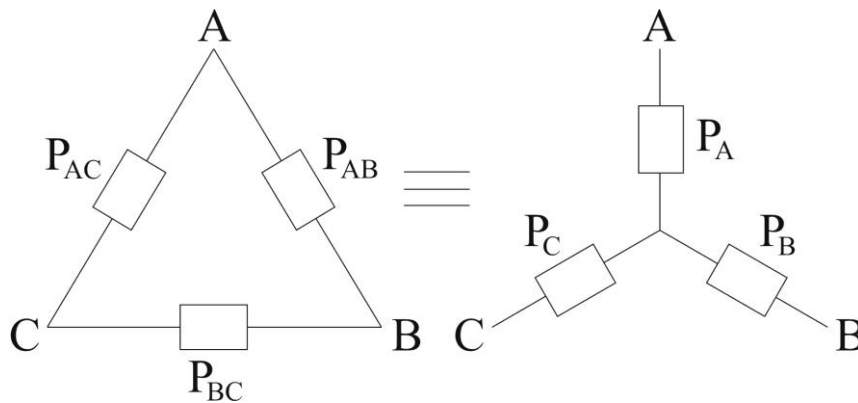


Рисунок 6.15 – Еквівалентне перетворення з'єднання трикутником у з'єднання зіркою

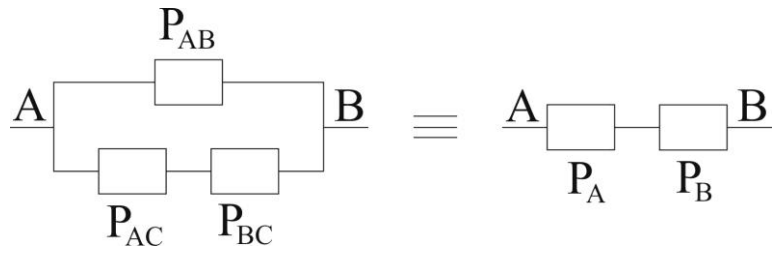
Для того, щоб вивести еквівалентне співвідношення між з'єднанням трикутником та з'єднанням зіркою, необхідно проаналізувати етапи перетворення зазначених схем, що наведені на рис. 6.16.

Розглянемо етап перетворення, що наведений на рис. 6.16 а. Визначимо ймовірність безвідмовної роботи системи, що складається з елементів, ймовірності безвідмовної роботи яких дорівнюють, відповідно,  $P_{AB}$ ,  $P_{BC}$  і  $P_{AC}$  (використовуючи метод спрощення схем):

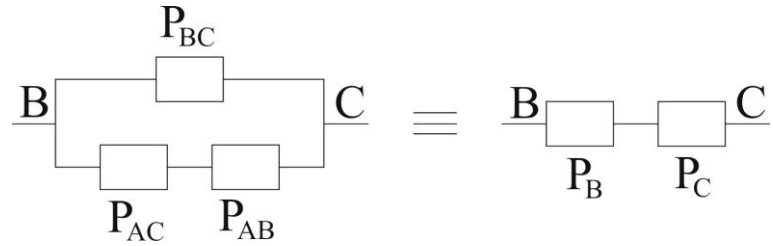
$$P_S = 1 - (1 - P_{AB})(1 - P_{AC} \cdot P_{BC}). \quad (6.10)$$

Що стосується системи з елементами, ймовірності безвідмовної роботи яких дорівнюють  $P_A$  і  $P_B$ , то для неї одержимо:

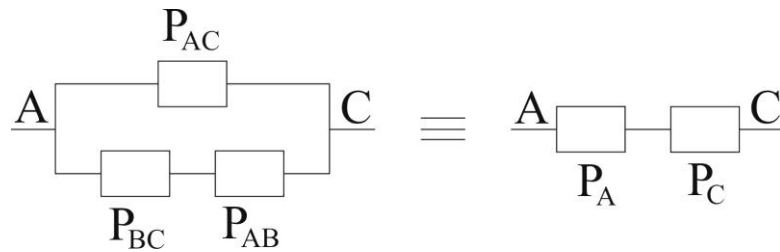
$$P_S = P_A \cdot P_B. \quad (6.11)$$



а)



б)



в)

**Рисунок 6.16 – Етапи перетворення з'єднання трикутником у з'єднання зіркою**

Оскільки системи, що наведені на рис. 6.16 а, є еквівалентними, то, прирівнюючи вирази (6.10) та (6.11), запишемо наступне рівняння:

$$P_A \cdot P_B = 1 - (1 - P_{AB})(1 - P_{AC} \cdot P_{BC}). \quad (6.12)$$

Аналогічні рівняння можна записати також для систем, що наведені на рис. 6.16 б і в:

$$P_B \cdot P_C = 1 - (1 - P_{BC})(1 - P_{AC} \cdot P_{AB}); \quad (6.13)$$

$$P_A \cdot P_C = 1 - (1 - P_{AC})(1 - P_{BC} \cdot P_{AB}). \quad (6.14)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (6.12)÷(6.14), одержимо наступні співвідношення між з'єднанням трикутником та з'єднанням зіркою:

$$P_A = \sqrt{\frac{[1 - (1 - P_{AB})(1 - P_{AC} \cdot P_{BC})] \cdot [1 - (1 - P_{AC})(1 - P_{BC} \cdot P_{AB})]}{1 - (1 - P_{BC})(1 - P_{AC} \cdot P_{AB})}}; \quad (6.15)$$

$$P_B = \sqrt{\frac{[1 - (1 - P_{AB})(1 - P_{AC} \cdot P_{BC})] \cdot [1 - (1 - P_{BC})(1 - P_{AC} \cdot P_{AB})]}{1 - (1 - P_{AC})(1 - P_{BC} \cdot P_{AB})}}; \quad (6.16)$$

$$P_C = \sqrt{\frac{[1 - (1 - P_{AC})(1 - P_{BC} \cdot P_{AB})] \cdot [1 - (1 - P_{BC})(1 - P_{AC} \cdot P_{AB})]}{1 - (1 - P_{AB})(1 - P_{AC} \cdot P_{BC})}}. \quad (6.17)$$

### 6.5.3 Мостова схема

Розглянемо обчислення ймовірності безвідмовної роботи для такої складної системи, як мостова схема. Дана схема наведена на рис. 6.17, причому ймовірності безвідмовної роботи її елементів позначимо через  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ,  $P_4$  і  $P_5$ .

Ймовірність безвідмовної роботи такої системи може бути визначена за допомогою наступного виразу:

$$P_s = 2P_1P_2P_3P_4P_5 - P_2P_3P_4P_5 - P_1P_3P_4P_5 - P_1P_2P_4P_5 - P_1P_2P_3P_5 - P_1P_2P_3P_4 + P_1P_3P_5 + P_2P_3P_4 + P_1P_4 + P_2P_5. \quad (6.18)$$

Якщо система, що наведена на рис. 6.17, складається з ідентичних елементів, тобто  $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = P$ , то вираз (6.18) буде мати вигляд:

$$P_s = 2P^5 - 5P^4 + 2P^3 + 2P^2. \quad (6.19)$$

У випадку, коли всі елементи системи є ідентичними і для них має місце експоненційний розподіл наробітку до відмови, тобто  $P(t) = e^{-\lambda t}$ , ймовірність безвідмовної роботи системи визначається так:

$$P_s(t) = 2e^{-5\lambda t} - 5e^{-4\lambda t} + 2e^{-3\lambda t} + 2e^{-2\lambda t}. \quad (6.20)$$

Для знаходження середнього наробітку до відмови системи  $T_{0s}$  необхідно здійснити інтегрування виразу (6.20) по  $t$  в інтервалі  $(0; \infty)$ :

$$T_{0s} = \int_0^{\infty} (2e^{-5\lambda t} - 5e^{-4\lambda t} + 2e^{-3\lambda t} + 2e^{-2\lambda t}) dt = \frac{49}{60\lambda}. \quad (6.21)$$

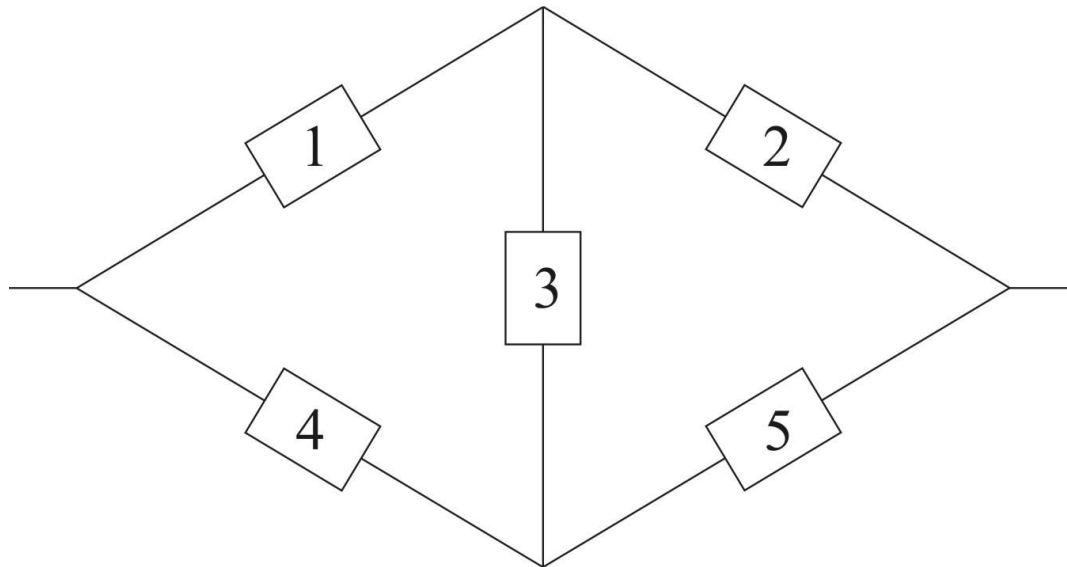


Рисунок 6.17 – Система, що складається з п'яти елементів, з'єднаних мостовою схемою

Слід зазначити, що визначення ймовірності безвідмовної роботи системи, елементи якої з'єднані мостовою схемою, можна також здійснити, послідовно застосовуючи метод перетворення з'єднання трикутником у з'єднання зіркою та метод спрощення схеми (мережі).

## 6.6 Надійність відновлюваних об'єктів і систем

### 6.6.1 Математична модель надійності відновлюваних об'єктів і систем

При розрахунку показників надійності відновлюваних об'єктів і систем найпоширенішими є наступні *припущення*:

- експоненційний розподіл наробітку між відмовами;
- експоненційний розподіл часу відновлення.

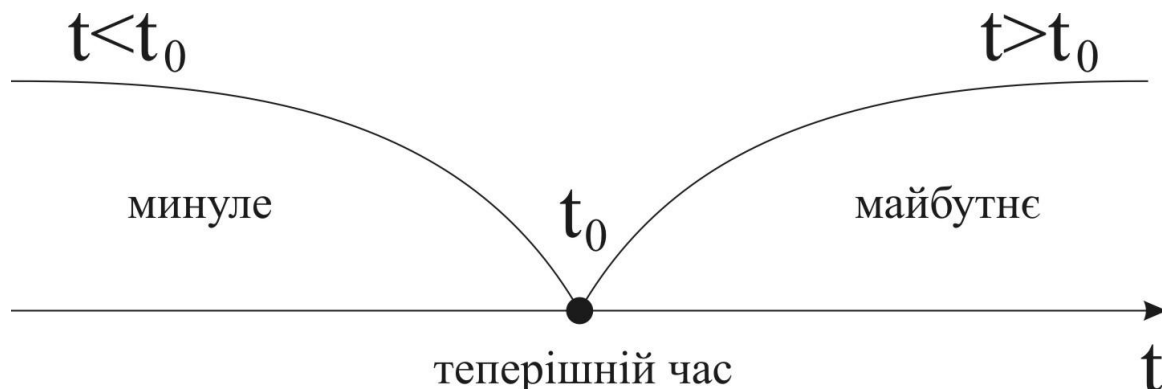
Припущення багато в чому є справедливими, оскільки, по-перше, експоненційний розподіл наробітку описує функціонування системи на ділянці нормальної експлуатації; по-друге, експоненційний розподіл описує процес без «передісторії».

Застосування експоненційного розподілу для опису процесу відновлення дозволяє при ординарних незалежних відмовах представити аналізовані системи у вигляді *марковських систем*.

При експоненційному розподілі наробітку між відмовами та часу відновлення, для розрахунку надійності відновлюваних об'єктів і систем використовують *метод диференціальних рівнянь для ймовірностей станів (рівнянь Колмогорова–Чепмена)*.

Випадковий процес у будь-якій фізичній системі  $S$  називається *марковським*, якщо він має наступну властивість: для будь-якого моменту  $t_0$  ймовірність стану системи в майбутньому ( $t > t_0$ ) залежить тільки від стану в

цей час ( $t = t_0$ ) і не залежить від того, коли і яким чином система прийшла в цей стан.



Для марковського процесу «майбутнє» залежить від «минулого» тільки через «сьогодення», тобто майбутнє протікання процесу залежить тільки від тих минулих подій, які вплинули на стан процесу в даний момент.

Марковський процес як процес без післядії не означає повної незалежності від минулого, оскільки воно проявляється в сьогодні.

При використанні методу, у загальному випадку, для системи  $S$  необхідно мати *математичну модель* у вигляді множини станів системи  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , у яких вона може перебувати при відмовах і відновленнях елементів.

Для того, щоб розглянути принцип складання моделі надійності відновлюваних об'єктів і систем, були введені наступні припущення:

- елементи системи, що відмовили (або сам розглянутий об'єкт), негайно відновлюються (початок відновлення збігається з моментом відмови);
- відсутні обмеження на кількість відновлень;
- якщо всі потоки подій, що переводять систему (об'єкт) зі стану в стан, є пуассонівськими (найпростішими), то випадковий процес переходів буде марковським процесом з неперервним часом і дискретними станами  $S_1, S_2, \dots, S_n$ .

*Основні правила складання моделі надійності:*

1. Математичну модель зображують у вигляді графа станів.

Елементи графа:

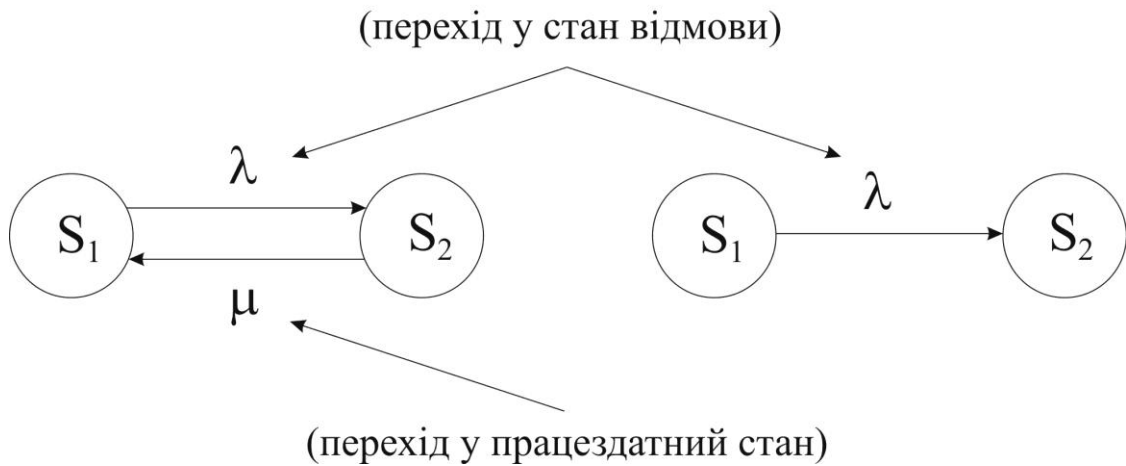
- а) кола (вершини графа  $S_1, S_2, \dots, S_n$ ) – можливі стани системи  $S$ , що виникають при відмовах та відновленнях елементів;
- б) стрілки – можливі напрямки переходів з одного стану  $S_i$  в інший  $S_j$ .

Над/під стрілками вказуються інтенсивності переходів.

Приклади графа:

відновлювальний об'єкт

невідновлювальний об'єкт



$S_1$  – працездатний стан;

$S_2$  – стан відмови.

«Петлею» можна позначати затримки в певному стані  $S_1$  або  $S_2$ :

– справний стан триває;

– стан відмови триває.

Граф станів відбиває кінцеву (дискретну) кількість можливих станів системи  $S_1, S_2, \dots, S_n$ . Кожна з вершин графа відповідає одному зі станів.

2. Для опису випадкового процесу переходу між станами (відмова/ відновлення) застосовують імовірності станів:

$$P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t), \dots, P_n(t),$$

де  $P_i(t)$  – ймовірність знаходження системи в момент  $t$  в  $i$ -му стані.

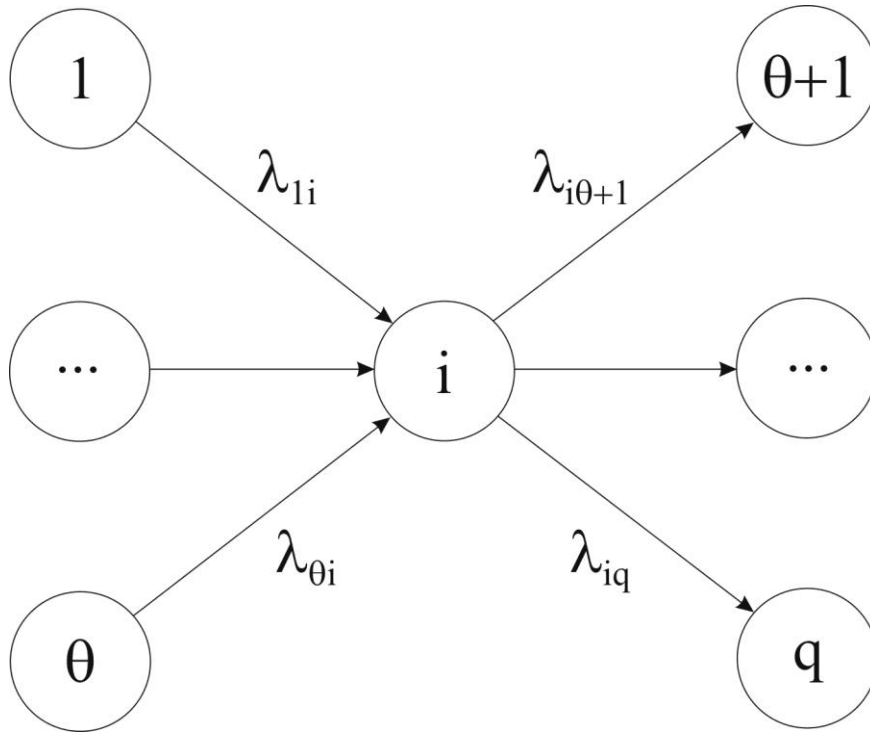
Очевидно, що для будь-якого  $t$ :

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1. \quad (6.22)$$

Умова (6.22) є нормуючою умовою, оскільки інших станів, крім  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , не існує.

3. За графом станів складається система звичайних диференціальних рівнянь першого порядку (рівнянь Колмогорова–Чепмена), що мають наступний вид:

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{\theta} \lambda_{ji} P_j(t) - P_i(t) \sum_{k=\theta+1}^q \lambda_{ik}, \quad i=1,2,\dots,n. \quad (6.23)$$



У загальному випадку, інтенсивності потоків  $\lambda_{ji}$  та  $\lambda_{ik}$  можуть залежати від часу  $t$ .

При складанні диференціальних рівнянь використовують просте мнемонічне правило:

- а) у лівій частині – похідна за часом  $t$  від  $P_i(t)$ ;
- б) кількість доданків у правій частині дорівнює кількості стрілок, що з'єднують розглянутий стан з іншими станами;
- в) кожен доданок правої частини дорівнює добутку інтенсивності переходу на ймовірність того стану, з якого виходить стрілка;
- г) знак добутку є позитивним, якщо стрілка спрямована до розглянутого стану, і негативним, якщо стрілка виходить із нього.

Перевіркою правильності складання рівнянь є рівність нулю суми їх правих частин.

4. Для розв'язання системи диференціальних рівнянь для ймовірностей станів  $P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t), \dots, P_n(t)$  необхідно задати початкове значення ймовірностей:

$$P_1(0), P_2(0), \dots, P_i(0), \dots, P_n(0), \text{ при } t = 0,$$

сума яких дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^n P_i(0) = 1.$$

Таким чином, розв'язання системи диференціальних рівнянь Колмогорова–Чепмена дозволить визначити ймовірності відповідних станів та обчислити показники надійності відновлюваного об'єкта або системи.

### 6.6.2 Показники надійності відновлюваних систем

Всі стани системи  $S$  можна розділити на підмножини:

- 1)  $S_K \subset S$  – підмножина станів, у яких система є працездатною;
- 2)  $S_M \subset S$  – підмножина станів, у яких система є непрацездатною.

При цьому виконуються наступні рівності:

$$\begin{aligned} S &= S_K \cup S_M, \\ S_K \cap S_M &= \emptyset. \end{aligned}$$

Розглянемо показники надійності відновлюваних систем:

1. *Функція готовності  $\Gamma(t)$  системи* визначає ймовірність знаходження системи у працездатному стані в момент  $t$ :

$$\Gamma(t) = \sum_{r=1}^K P_r(t) = 1 - \sum_{v=1}^M P_v(t), \quad (6.24)$$

де  $P_r(t)$  – ймовірність знаходження системи у працездатному  $r$ -му стані;  
 $P_v(t)$  – ймовірність знаходження системи у непрацездатному  $v$ -му стані.

2. *Функція простою  $\Pi(t)$  системи:*

$$\Pi(t) = 1 - \Gamma(t) = \sum_{v=1}^M P_v(t). \quad (6.25)$$

3. *Коефіцієнт готовності системи* визначається при сталому режимі експлуатації (при  $t \rightarrow \infty$ ). При  $t \rightarrow \infty$  встановлюється *граничний стаціонарний режим*, у ході якого система переходить зі стану до стану, але ймовірності станів при цьому не змінюються:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_i(t) = P_i, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$



Коефіцієнт готовності  $k_{z.c.}$  можна розрахувати за системою диференціальних рівнянь (6.23), прирівнюючи нулю їх ліві частини  $\frac{dP_i(t)}{dt} = 0$ , оскільки  $P_i = const$  при  $t \rightarrow \infty$ . Тоді система рівнянь (6.23) перетворюється в систему алгебраїчних рівнянь виду:

$$0 = \sum_{j=1}^{\theta} \lambda_{ji} P_j - P_i \sum_{k=\theta+1}^q \lambda_{ik}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (6.26)$$

а коефіцієнт готовності:

$$k_{z.c.} = \lim_{t \rightarrow \infty} \Gamma(t) = \sum_{r=1}^K P_r, \quad (6.27)$$

є граничним значення функції готовності при сталому режимі  $t \rightarrow \infty$ .

4. *Параметр потоку відмов системи:*

$$\omega(t) = \sum_{r=1}^K \sum_{v=1}^M \lambda_{rv} P_v(t), \quad (6.28)$$

де  $\lambda_{rv}$  – інтенсивності переходів із працездатного стану в непрацездатний.

5. *Функція потоку відмов:*

$$W(t) = \int_0^t \omega(t) dt. \quad (6.29)$$

6. *Середній наробіток між відмовами в інтервалі  $(0;t)$ :*

$$T_0(t) = \frac{\int_0^t \Gamma(t) dt}{W(t)}. \quad (6.30)$$

При  $t \rightarrow \infty$ , середній наробіток між відмовами має вигляд:

$$T_0 = \frac{k_{z.c.}}{\omega}.$$

## Контрольні питання та завдання до шостого розділу

1. Назвіть основну мету та задачі розрахунку показників надійності систем.
2. Поясніть основні етапи розрахунку надійності систем.
3. Що таке структура надійності?
4. Які існують види резервування? В чому полягає різниця між навантаженим та ненавантаженим резервуванням?
5. Що таке кратність резервування?
6. Що являє собою основна система і в чому полягає умова її безвідмовної роботи?
7. Яким чином визначається ймовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов основної системи?
8. Яким чином визначається щільність розподілу відмов та середній наробіток до відмови основної системи?
9. Який закон розподілу наробітку до відмови буде мати основна система, якщо наробіток до відмови всіх її елементів має експоненційний розподіл?
10. Що являє собою система з навантаженим резервуванням і в чому полягає умова її безвідмовної роботи?
11. Чим відрізняються системи з навантаженим резервуванням із цілою та дробовою кратністю?
12. Яким чином визначаються показники надійності системи з навантаженим резервуванням?
13. Назвіть особливості системи з ненавантаженим резервуванням.
14. Назвіть основні припущення при розрахунках показників надійності системи з ненавантаженим резервуванням.
15. Яким чином визначаються показники надійності системи з ненавантаженим резервуванням?
16. За яких умов ненавантажене резервування є більш ефективним, ніж навантажене?
17. Проаналізуйте, яким чином змінюється ймовірність безвідмовної роботи системи з ненавантаженим резервуванням за збільшення кратності резервування?
18. Сформулюйте умову працездатності системи з полегшеним резервуванням.
19. Яким чином визначається ймовірність безвідмовної роботи системи з полегшеним резервуванням?
20. Що являє собою система з ковзним резервуванням?
21. Яким чином визначається ймовірність безвідмовної роботи системи з ковзним резервуванням?
22. Сформулюйте метод спрощення схеми (мережі).
23. Проаналізуйте метод перетворення з'єднання трикутником у з'єднання зіркою.
24. Яким чином визначається ймовірність безвідмовної роботи системи, елементи якої з'єднані мостовою схемою?

25. У чому полягають особливості марковського процесу, на якому ґрунтується розрахункова модель для відновлюваних об'єктів і систем?

26. Наведіть основні етапи складання розрахункової моделі для відновлюваних об'єктів і систем.

27. Що являє собою система диференціальних рівнянь Колмогорова-Чепмена?

28. Поясніть мнемонічне правило складання диференціального рівняння Колмогорова-Чепмена.

29. Дайте визначення та поясніть сутність показників надійності відновлюваних об'єктів та систем.

## ГЛАВА 7. ОСНОВИ ТЕОРІЇ ТЕХНОГЕННОГО РИЗИКУ

### 7.1 Поняття техногенного ризику

Слово «ризик» має давнє коріння – в перекладі зі староіталійського *risicare* означає «відважитися». Історія формування поняття «ризик» значною мірою пов'язана зі ставленням людини до майбутнього.

У Древній Греції міфологізований світогляд ґрунтувався на тому, що майбутнє повністю зумовлено волею і бажанням богів, тобто абсолютно не залежить від поведінки людини.

Виникнення світових релігій та, насамперед, християнства призвело до того, що майбутнє стало неоднозначним. З'явилося розуміння того, що можливість «різного» майбутнього як у теперішньому житті, так і після смерті залежить від поведінки людини. Тому з'явилася відповідальність за наслідки своїх дій.

У середні віки відбулося усвідомлення того, що майбутнє залежить не тільки від Бога. Одним з тих, хто вперше наголосив на цій проблемі, був італійський монах, професор математики Лука Начислі, що проживав у XV ст. В епоху Відродження почалося серйозне вивчення проблем, пов'язаних з ризиком. Завдяки розвитку азартних ігор і насамперед гри в кістки з'явилася можливість прогнозування майбутнього. Досліджуючи азартні ігри, французький математик, філософ і винахідник Блез Паскаль у 1654 р. звернувся за допомогою до математика П. Ферма. Результат співпраці – *створення теорії ймовірностей*. Вона стала величезним світоглядним і практичним стрибком, вперше дозволивши робити кількісні прогнози майбутнього. З тих пір інструменти прогнозування, подібні ворожінню, почали відходити в минуле.

На початку XVIII ст. німецький математик Г. Лейбніц висунув ідею, а швейцарський математик Я. Бернуллі (1654–1705) обґрунтував *закон великих чисел* і розробив *процедури статистики*.

З 1725 р., коли вперше урядом Англії були застосовані таблиці смертності, цей інструмент швидко поширився в усьому світі.

У 1730 р. французький математик А. Муавр ввів поняття *структури нормального розподілу і міру ризику – стандартне відхилення*. У 1738 р. Д. Бернуллі визначив *очікувану корисність*, на яку в кінцевому рахунку спирається сучасна теорія портфельних інвестицій. З 1763 р., завдяки *теоремі Байєса (теоремі гіпотез)*, світ дізнався, як впливає на прийняття рішень ступінь інформованості про об'єкт управління.

Таким чином, відкриття основних законів і розробка практично всіх сучасних інструментів управління ризиками відноситься до XVII–XVIII ст.

Промислова революція, соціальні потрясіння, розширення сфер діяльності людини істотно збільшили сфери прояву ризику і одночасно сформували ставлення до майбутнього як частково прогнозованого стану світу.

Відзначимо, зокрема, розробку *теорії статистичної регресії* англійським математиком Ф. Галтоном у 1886 р.

Ризик притаманний будь-якій сфері людської діяльності, що пов'язано з безліччю умов і факторів, що впливають на результат (позитивний чи негативний) прийнятих людьми рішень.

Ризик недоотримання намічених результатів почав особливо проявлятися під час розвитку товарно-грошових відносин, конкуренції учасників господарської діяльності. Досить широке і одночасно конструктивне трактування ризику почали використовувати у страхуванні, оскільки вказана сфера підприємницької діяльності безпосередньо пов'язана з існуванням і різними формами прояву ризику. Саме завдяки страхуванню сформувався розуміння ризику як економічної категорії.

З виникненням і розвитком ринкової економіки з'являються різні теорії ризику. Одним з перших проблеми економічних ризиків розглянув американський економіст А. Маршалл, праці якого поклали початок неокласичної теорії ризиків. Американський економіст Дж.М. Кейнс ввів у науку поняття «схильність до ризику», характеризуючи інвестиційні та підприємницькі ризики, запропонував одну з перших класифікацій ризиків.

У роботі американського економіста Ф. Найта «Ризик, невизначеність і прибуток» вперше була висловлена думка про ризик як кількісну міру невизначеності. У працях американських математиків О. Моргенштерна і Дж. Наймана було встановлено взаємозв'язок понять «невизначеність» і «ризик», відображено ймовірно-математичне трактування ризику.

На початку ХХ ст. класик теорії управління французький інженер А. Файоль включив до складу основних функцій управління організацією *функцію забезпечення її безпеки*.

Остаточно наука про ризик сформувалася тільки в останній чверті ХХ ст., завдяки насамперед практичним потребам забезпечення безпеки в технісфері (зокрема ядерній енергетиці та інших потенційно небезпечних технологіях) і стабільності в економіці.

### **7.1.1 Концепції ризику**

*Ризик* – це прояв фундаментальної властивості природи: індетермінізму, неповної визначеності. У процесі пізнання і в прагненні повніше задовольнити свої потреби люди постійно намагаються розширити межі передбачуваності процесів і явищ, що викликають інтерес, заглиблюючись у них. Однак паралельний процес ускладнення антропосфери знову відсуває рішення цієї задачі. Платою людства за підвищення якості життя у процесі пізнання світу і практичного використання нових знань, які значною мірою є невизначеними, є ризик. Тому завдання полягає не в ухиленні від ризиків, а в їх оптимізації по відношенню до тих завдань, які ставить перед собою людина або організація.

Ризик проявляється в різних формах практично в усіх областях діяльності людини, функціонування і розвитку організацій, їх взаємодії з навколишнім середовищем. Прояв ризику в різних сферах діяльності людини спричинило численні його трактування. Значна частина визначень поняття «ризик» пов'язана із двома твердженнями: ризик обумовлений випадковими подіями або процесами; наслідки цих подій або процесів є небажаними. Однак для повноти картини необхідно пам'ятати, що прояв ризику в загальному випадку може мати і позитивні наслідки, інакше неможливо зрозуміти, чому люди прий-

мають на себе ризик. Поведінка, пов'язана з прийняттям ризику, являє собою балансування між випадковими втратами і випадковими винагородами.

До загальних, що визначають поняття і прояви ризику, належать такі властивості:

- ризик є багатовимірною характеристикою майбутніх станів світу;
- ризик пов'язаний з випадковими явищами і процесами;
- прояв ризику – умовна подія.

Ризик проявляється під час взаємодії людини з природою і техносферою. У зв'язку з цим можна виділити наступні області:

– *об'єктивного змісту ризику*, вимірного і незалежного від людського сприйняття. Його можна ідентифікувати, оцінювати та прогнозувати на базі фундаментальних закономірностей;

– *суб'єктивного змісту ризику*, пов'язаного з його індивідуальним сприйняттям. Дана сфера ризику відноситься до ментального стану індивідуума, який потрапляє в ситуацію невизначеності або сумнівів щодо наслідків деякої події (відповідно розрізняють *дійсний* і *уявний ризики*).

У зв'язку з тим, що ризик пов'язаний з діяльністю в умовах, з одного боку, реально існуючої невизначеності, а з іншого – вибору зацікавленим індивідуумом певних альтернатив і розрахунком ймовірності їх результату, то він являє собою діалектичну єдність об'єктивного і суб'єктивного.

З цієї точки зору ризик ототожнюється з діяльністю, пов'язаною з подоланням невизначеності в ситуації неминучого вибору, у процесі якої існує можливість кількісно і якісно оцінити ймовірність досягнення передбачуваного результату, невдачі і відхилення від мети.

В наш час на практиці використовують декілька *концепцій ризику*.

1. Враховуючи, що ризики пов'язані з перетворювальною діяльністю людини у процесі пізнання природи, дійсності, їх непізнаними сторонами, що проявляються у вигляді шкоди для людини, то найбільш часто ризик пов'язують з поняттями *небезпеки і/або загрози*. В рамках цієї концепції розглядають негативні події, які заподіюють шкоду людині й організаціям, а під ризиком розуміють можливість настання подій з негативними наслідками, тобто можливість реалізації передбачуваної небезпеки. *Управління ризиками* – це способи зменшення ймовірності настання негативних подій і (або) наслідків від них за допомогою заходів, які вимагають розумних витрат. Зазначена концепція лежить, зокрема, в основі теорії природної та техногенної безпеки.

2. Ризик існує скрізь, де є невизначеність майбутнього. Ризик тим вище, чим більш багатоваріантними є майбутнє. Концепція *ризик як невизначеності* апелює до такого теоретичного поняття як ймовірнісний розподіл можливих (позитивних і негативних) фіналів деякої операції. За наявності невизначеності та альтернатив *ризик* – це можливість реалізації найгірших альтернатив. В рамках зазначеної концепції ризик є мірою невідповідності між різними результатами рішень, які оцінюють із точки зору їх корисності, шкідливості, а також ефективності за критеріями відповідності обраним орієнтирам; ступенем невизначеності економічного результату в майбутньому; можливістю появи обста-

вин, що зумовлюють невпевненість або неможливість отримання очікуваних результатів від реалізації поставленої мети. Концепцію ризику як невизначеності використовують у теорії прийняття рішень, теорії ігор, портфельного інвестування, а ризик-менеджмент в її рамках спрямований на зменшення дисперсії між очікуваними результатами і дійсними результатами.

3. Нарешті концепція *ризик* як *можливості* основана на взаємозв'язку між ризиком і прибутковістю. Не випадково, відповідно до тлумачного словника С.І. Ожегова, *ризик* – це дія навмання в надії на щасливий випадок. Чим вищим є ризик, тим вищим є потенційний прибуток. Зазначеній концепції ризику більш близьким є поняття шансу, а ризик-менеджмент означає використання техніки максимізації прибутку за умов одночасного обмеження втрат. Вона використовується при управлінні фінансовими та економічними ризиками.

Таким чином, можна дати наступне інтегральне визначення ризику: *ризик* – це можливість того, що дії людини або їх результати призведуть до негативних або позитивних наслідків.

### 7.1.2 Показники техногенного ризику

Історично першим для вимірювання ризику використовувався підхід, що ґрунтувався на вимірюванні збитків у несприятливій ситуації (описується у книзі «Логіка, мистецтво мислити», що видана у французькому монастирі Порт-Рояль у 1662 р.). Найпростішою мірою ризику при даному підході є пара: ймовірність  $Q$  небажаної події та наслідки  $w$  у випадку її настання. Обидва показники можуть бути мультиплікативним чином поєднані в один:  $R = Q \cdot w$ , що дозволяє порівнювати ситуації з різними наслідками та ймовірностями їх настання. Використовувати ймовірність втрат як кількісну міру ризику вперше запропонував французький математик А. Муавр на початку XVIII ст.

Існування суб'єктивної складової ризику потребувало залучення нових вимірників, до яких можна віднести лінгвістичні змінні та суб'єктивну ймовірність.

В рамках концепції ризику як небезпеки, залежно від можливості формалізації задачі та наявної вихідної інформації, використовують такі показники:

- кількісні;
- якісні, які застосовують тоді, коли відсутня можливість кількісних оцінок (необхідні статистичні дані, моделі). Для їх визначення використовують експертне оцінювання.

Різні кількісні та якісні показники необхідні для забезпечення порівняння ступеня ризику для людини, різних соціальних систем, видів діяльності, причин (джерел небезпеки), обґрунтованого і раціонального вибору, для реалізації проєктів за наявності альтернатив.

*Кількісні показники.* Кількісно ризик найчастіше визначається як можливість реалізації певної небезпеки, можливість настання подій з негативними наслідками, тобто характеризується сукупністю двох властивостей:

1) *можливістю заподіяння шкоди.* Тому ризик часто пов'язують з розміром  $w$  збитків від негативної події або небезпечного явища, як правило, в натуральному (кількість постраждалих і загиблих, розмір зони дії небезпеч-

них факторів) або вартісному виразі. Розрізняють збиток від реальної (проводять оцінку фактичної шкоди) і гіпотетичної негативної події.

Якщо розглядають гіпотетичну негативну подію, то про відповідні види збитків говорять як про передбачувані. Для різних сценаріїв розвитку небезпечного явища у надзвичайну ситуацію розрахунковим методом прогнозують різні значення збитку;

2) невизначеністю настання небезпечної події  $Q$ . Якщо настання події є закономірним, то її ймовірність дорівнює 1 і ризику немає; якщо події на розглянутому інтервалі часу є масовими і, отже, цілком передбачуваними, то ймовірність їх настання за розглянутий інтервал часу наближається до 1. Тоді ризику також немає, хоча збиток є. Однак якщо роль відіграє і розкид збитку, то ризик все ж таки є, а для його виміру використовують показники невизначеності.

Таким чином, показником ризику в рамках концепції ризику як небезпеки є наступний вираз:

$$\begin{aligned} \text{Показник ризику} \left[ \frac{\text{Збитки}}{\text{Час}} \right] &= \\ &= \text{Частота} \left[ \frac{\text{Події}}{\text{Час}} \right] \times \text{Середні збитки} \left[ \frac{\text{Збитки}}{\text{Події}} \right]. \end{aligned}$$

*Приклад 7.1.* Розглядають 2 варіанти системи енергопостачання об'єкта. Частота аварії для першого дорівнює  $10^{-1}$  1/рік, а для другого –  $10^{-3}$  1/рік. Можливі збитки у випадку аварії першої системи складають 2 млн грн., а другої – 100 млн грн. Який проєкт є кращим з точки зору безпеки?

*Розв'язок.*

Ризик експлуатації першої системи складає:

$$R_1 = Q_1 \cdot w_1 = 10^{-1} \cdot 2 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^5 \text{ грн./рік.}$$

Відповідно для другого варіанта:

$$R_2 = Q_2 \cdot w_2 = 10^{-3} \cdot 10^8 = 10^5 \text{ грн./рік.}$$

Оскільки  $R_2 < R_1$ , то другий варіант є кращим із точки зору безпеки.

*Якісні показники.* Розробка моделей для ймовірності реалізації негативної події та вартісного виразу різноманітних збитків для всіх об'єктів впливу є достатньо трудомісткою. Тому на практиці часто використовують якісні методи, що ґрунтуються на встановленні категорій ймовірності  $Q$  (реалізованості) та наслідків  $w$ , а потім присвоєнні кожній категорії відповідного рейтингу. Сполучаючи дані дві моделі, можна побудувати матрицю якісно-кількісних характеристик ризику  $R = Q \cdot w$ , елементи якої для певного об'єкта одержують добутком компонент, що складають ризик. Аналіз даної матриці дозволить дійти висновків стосовно рівня ризику на відповідному об'єкті.



Приклад 7.2. Необхідно визначити якісний показник ризику виникнення аварії на екологічно небезпечному об'єкті, для якого якісні характеристики реалізованості та наслідків задані у табл. 7.1 і 7.2. Матриця якісно-кількісних характеристик ризику наведена у табл. 7.3.

Таблиця 7.1 – Характеристика реалізованості ризиків

Рівень реалізованості $Q$	Ступінь реалізованості	Опис реалізованості	Відповідна кількісна оцінка $Q$ , 1/рік
1	Неймовірно	Подія може статися тільки за виключних обставин. Скоріше за все, подія не станеться за весь час існування системи	$<10^{-3}$
2	Малоймовірно	Подія навряд чи станеться протягом часу існування системи, але виключати її з розгляду не доцільно	0,001–0,01
3	Ймовірно	Подія може статися у деяких випадках (виникає у середньому 1 раз за час існування системи)	0,01–0,1
4	Достатньо ймовірно	Подія буде відбуватися за більшості обставин (виникає декілька разів за час існування системи)	0,1–0,5
5	Майже напевно	Очікується, що подія буде відбуватися за всіх обставин (відбуватиметься достатньо часто за час існування системи)	$>0,5$

Таблиця 7.2 – Якісна характеристика наслідків подій

Рівень наслідків $w$	Ступінь наслідків	Опис наслідків	Відповідна кількісна оцінка $w$ , \$/аварія
1	Незначні	Відсутні травми, незначні ушкодження, викиди	$<10^3$
2	Малі	Малі ушкодження, незначні травми, швидка ліквідація наслідків власними силами	$10^3-10^4$
3	Помірні	Ушкодження середнього ступеня важкості, незначні порушення функцій об'єкта, травми з тимчасовою втратою працездатності	$10^4-10^5$
4	Значні	Нещасні випадки з довготривалою втратою працездатності, невеликі руйнування, значне порушення функцій об'єкта, значні аварійні викиди	$10^5-10^6$
5	Катастрофічні	Летальні випадки, значні руйнування, повне порушення функцій об'єкта, ліквідація наслідків потребує значних ресурсів	$>10^6$

Таблиця 7.3 – Матриця якісно-кількісних характеристик ризику

Реалізованість, $Q$	Наслідки, $w$				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10
3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

Для оцінки ризику виникнення аварії враховують судження 10 експертів, що зведені у таблицю 7.4.

Таблиця 7.4 – Оцінка експертами ризику виникнення аварії

№ експерта	Оцінка $Q$	Оцінка $w$
1	3	2
2	4	1
3	2	2
4	4	3
5	1	4
6	2	3
7	3	2
8	4	4
9	2	4
10	4	1

Необхідно прийняти рішення стосовно управління ризиком виникнення аварії на екологічно небезпечному об'єкті.

*Розв'язок.*

Обробка суджень експертів дозволила визначити середні значення реалізованості та наслідків ризику:

$$\bar{Q} = 2,9; \bar{w} = 2,6.$$

Тоді якісно-кількісна оцінка ризику:

$$\bar{R} = \bar{Q} \cdot \bar{w} = 2,9 \cdot 2,6 = 7,54.$$

Відповідно до табл. 7.3 можна виділити наступні області ризику:

- безумовно припустимого ризику ( $\bar{R} < 5$ );
- обмежено припустимого ризику ( $5 \leq \bar{R} < 15$ );
- неприпустимого ризику ( $\bar{R} \geq 15$ ).

Таким чином, даний об'єкт знаходиться в області обмежено припустимого рівня ризику. У табл. 7.5 наведено характеристики ризику та необхідні дії щодо зменшення його рівня.

Таблиця 7.5 – Характеристика ризику

Категорія	R	Необхідні дії	Прийнятність
Екстремальний	>20	Необхідні негайні дії	Неприпустимий (надмірний)
Високий	15–20	Необхідна підвищена увага керівництва та відповідальних осіб	
Середній	10– 5	Необхідне визначення відповідальних осіб	Обмежено припустимий (прийнятний)
Низький	5–10	Застосовуються звичайні процедури управління	
Незначний	<5	–	Безумовно припустимий

Відповідно до табл. 7.5 на даному об'єкті необхідно застосовувати звичайні процедури управління.

## 7.2 Існуючі підходи до нормування ризиків в Україні

До основних документів, які здійснюють нормування ризиків в Україні, відносяться:

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 22 січня 2014 р. № 37-р «Про схвалення Концепції управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» (далі – Концепція).

2. Постанова Кабінету Міністрів України від 5 вересня 2018 р. № 715 «Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки Державною службою з надзвичайних ситуацій».

Розглянемо зазначені нормативно-правові акти більш докладно.

*Концепція управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру.*

*Проблема, яка потребує розв'язання*

Підвищення ступеня захищеності населення і територій України від надзвичайних ситуацій, зменшення ризиків виникнення та мінімізація наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру (далі – надзвичайні ситуації) належить до пріоритетних завдань єдиної державної системи цивільного захисту.

За результатами аналізу функціонування єдиної державної системи цивільного захисту впровадження на території України сучасних принципів регулювання у сфері техногенної та природної безпеки здійснюється повільними темпами. Запровадження європейських стандартів безпечної життєдіяльності, що є однією з вимог інтеграції України в ЄС, є можливим за умови реалізації концептуальних і методологічних інновацій та інституціональних перетворень.

Необхідність впровадження концептуальних засад управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій (далі – ризики) викликана наявністю небезпечних чинників техногенного та природного характеру, зокрема:

– значної кількості потенційно небезпечних об'єктів на території;

– високого рівня травматизму та смертності населення, спричиненого небезпечними подіями та нещасними випадками;

– високого рівня ризиків виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру, зумовленого глобальними та регіональними змінами клімату, зростанням сейсмічної активності тощо, а також інтенсифікацією впливу техногенної діяльності людини на навколишнє природне середовище;

– високого рівня ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру, зумовленого критичним ступенем зношеності (60–80 відсотків) основних виробничих фондів у галузях промисловості та агропромислового комплексу;

– недостатнього технічного і технологічного рівнів розвитку державної системи спостережень за небезпечними чинниками, що зумовлюють виникнення надзвичайних ситуацій.

Ураховуючи світовий досвід, найбільш ефективним є управління ризиками, яке ґрунтується на досягненні певного рівня безпеки, балансу вигод і витрат у межах окремого об'єкта, території та держави в цілому.

На сьогодні механізми управління ризиками, спрямовані на зменшення їх значень, не набули широкого практичного застосування. Так, кількісна оцінка ризиків використовується лише в окремих областях, а саме під час аналізу безпеки атомних електричних станцій, декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. Разом з тим недосконалі нормативно-правові, організаційні та технічні методи управління ризиками не дають змоги сьогодні досягти рівнів ризиків, що відповідають рівням економічно розвинутих держав.

#### *Мета і етапи реалізації Концепції*

Метою Концепції є запровадження сучасних методів управління ризиками для зменшення кількості та мінімізації соціально-економічних наслідків надзвичайних ситуацій, забезпечення досягнення гарантованого рівня безпеки громадянина і суспільства.

Концепція розрахована на довгострокову перспективу і є основою для розроблення нормативно-правових актів, загальнодержавних, регіональних та галузевих програм у сфері техногенної та природної безпеки.

Досягнення прийнятних рівнів ризиків на всій території України повинно здійснюватися поетапно.

На першому етапі необхідно визначити рівні ризиків для усіх галузей економіки, а також найбільш небезпечних джерел надзвичайних ситуацій та забезпечити їх зменшення до значень прийнятих рівнів ризику.

На другому етапі слід забезпечити досягнення рівнів ризиків на всій території України відповідно до рівнів, що використовуються в економічно розвинутих державах.

#### *Шляхи та способи розв'язання проблеми*

Проблема може бути розв'язана шляхом:

– забезпечення єдності принципів формування і проведення державної політики у сфері техногенної та природної безпеки;

– забезпечення нормування рівнів ризиків;

– розроблення механізмів державного регулювання у сфері управління ризиками.

Управління ризиками повинно здійснюватися на таких принципах:

– *прийнятності*, який полягає у визначенні та досягненні у державі соціально, економічно і технічно обґрунтованих нормативних значень ризиків для населення, навколишнього природного середовища та об'єктів економіки;

– *превентивності*, який передбачає максимально можливе і завчасне виявлення небезпечних значень показників стану чи небезпечного процесу, які створюють загрозу виникнення надзвичайних ситуацій, та вжиття конкретних заходів, спрямованих на нейтралізацію такої загрози та/або мінімізації її наслідків;

– *мінімізації*, згідно з яким ризик необхідно зменшувати до рівня досягнення розумного компромісу між безпекою та розміром витрат на її забезпечення;

– *повноти*, відповідно до якого ризики для життєдіяльності людини чи функціонування будь-якого об'єкта є інтегральною величиною, яка повинна визначатися з урахуванням усіх загроз виникнення аварій та/або надзвичайних ситуацій, а також людського фактора;

– *адресності*, який полягає в тому, що ризиком повинен управляти той суб'єкт управління ризиком, на об'єкті або території якого він існує;

– *вибору доцільного значення*, відповідно до якого суб'єкт управління ризиком забезпечує в межах від мінімального до гранично допустимого таке значення ризику, яке він вважає доцільним, виходячи з наявних у нього економічних, технічних і матеріальних ресурсів та існуючих соціальних і політичних умов; суб'єкт управління ризиком, вибираючи доцільне значення ризику, гарантує певний рівень безпеки для населення та сплату страхових виплат у разі виникнення надзвичайних ситуацій;

– *обов'язковості інформування*, який полягає в тому, що кожний суб'єкт управління ризиком зобов'язаний регулярно надавати органам державної влади та органам місцевого самоврядування існуючі значення;

– *свободи інформації*, відповідно до якого необхідно враховувати громадську думку під час вирішення питань щодо будівництва та експлуатації існуючих потенційно небезпечних об'єктів.

Нормування рівнів ризиків включає розроблення і затвердження норм захисту населення і територій України від надзвичайних ситуацій, правил і регламентів господарської діяльності, які визначаються на основі значень прийнятних рівнів ризику. Для кожної галузі економіки, кожного виду небезпечної виробничої діяльності, типу об'єкта, окремої території України визначаються свої нормативи мінімального та гранично допустимого рівнів ризиків.

Нормування рівнів ризиків забезпечить:

– єдність методологічних підходів до оцінки ризиків, які існують на всій території України, та тих джерел небезпеки поза її межами, що можуть мати транскордонний вплив;

– стандартизацію методів нормування;

– врахування значущості всіх наслідків соціально-економічного, природно-ресурсного, екологічного та іншого характеру, які можуть бути спричи-

нені очікуваними надзвичайними ситуаціями техногенного і природного характеру;

- врахування особливостей видів виробничої діяльності, техногенного навантаження територій, природно-кліматичних особливостей, цінності окремих територій;

- галузеву і територіальну диференціацію нормативів ризиків;

- врахування всіх факторів, що впливають на величину ризиків, пов'язаних із розміщенням, будівництвом та експлуатацією потенційно небезпечних об'єктів, створенням нової техніки, технологій і матеріалів;

- періодичне коригування нормативів ризиків.

Умовою реалізації нормування рівнів ризиків у господарській діяльності є визначення і забезпечення досягнення необхідних показників надійності тих технічних елементів та технологій, які можуть призводити до виникнення аварій, а також показників надійності систем протиаварійного захисту та захисних споруд.

Основою нормативної бази ризиків є два основних нормативних рівні ризиків: мінімальний і гранично допустимий.

Під час визначення рівнів прийнятних ризиків застосовуватимуться значення ризиків, що використовуються в економічно розвинутих державах, а саме:

- мінімальний ризик – менший або який дорівнює  $1 \cdot 10^{-8}$ ;

- гранично допустимий ризик – який дорівнює  $1 \cdot 10^{-5}$ .

Ризик, значення якого нижче або дорівнює мінімальному, вважається *абсолютно прийнятним*.

Ризик, значення якого більше гранично допустимого, вважається *абсолютно неприйнятним*.

Основними механізмами державного регулювання у сфері управління ризиками є державна стандартизація, сертифікація, державна експертиза, державний нагляд і контроль, ліцензування, економічне регулювання, декларування безпеки небезпечних об'єктів і страхування.

Особливості та ступінь впливу державного регулювання на конкретні об'єкти управління повинні визначатися з урахуванням значень їх реальних ризиків, а також здійснених заходів щодо мінімізації ризиків на всіх стадіях життєвого циклу небезпечних об'єктів (проектування, розміщення, будівництво, монтаж, пуск в експлуатацію, функціонування, ліквідація).

Основою державної системи управління у сфері техногенної та природної безпеки і, відповідно, управління ризиками повинні стати економічні механізми; їх метою є утворення економічного фундаменту функціонування цієї системи на всіх рівнях управління безпекою, починаючи від об'єктового і закінчуючи загальнодержавним. Комплекс економічних механізмів регулювання повинен забезпечити оптимальний баланс економічних витрат і рівня техногенної та природної безпеки в умовах обмежених ресурсів держави.

Пріоритетним напрямом є міжнародне співробітництво у сфері управління ризиками для забезпечення підвищення ефективності запобігання виникненню масштабних надзвичайних ситуацій та новим видам загроз.

Об'єднання роботи систем цивільного захисту України та інших держав з метою вирішення завдань з управління ризиками викликано:

- глобальним характером окремих надзвичайних ситуацій;
- можливістю поширення наслідків певних видів надзвичайних ситуацій на території інших держав;
- міжнародними зобов'язаннями України щодо запобігання виникненню масштабних надзвичайних ситуацій, а також щодо інформування, нейтралізації й надання допомоги у разі їх виникнення;
- необхідністю інтеграції України в європейську мережу моніторингу надзвичайних ситуацій;
- наявністю вигод від міжнародного співробітництва у сфері управління ризиками.

*Очікувані результати.*

Реалізація Концепції дасть змогу:

- запровадити нові дієві форми аналізу, оцінки, експертизи і контролю безпеки потенційно небезпечних об'єктів на всіх етапах життєвого циклу;
- запровадити нормування рівнів ризиків та застосування відповідних норм під час удосконалення механізмів державного регулювання у сфері техногенної та природної безпеки;
- створити сприятливі умови для запровадження системи аналізу та управління ризиками як основи регулювання безпеки населення і територій України;
- прискорити формування єдиного підходу з управління безпекою в усіх сферах і галузях виробництва;
- забезпечити прозорість, відкритість і ефективність діяльності органів державної влади у сфері управління ризиками.

*Критерії, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки Державною службою з надзвичайних ситуацій.*

1. До критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері техногенної та пожежної безпеки, належать:

- вид об'єкта (приміщення, будівля, споруда, будинок, територія), що належить суб'єкту господарювання на праві власності, володіння, користування (далі – об'єкт);
- площа об'єкта;
- максимальна розрахункова (проектна) кількість людей, які постійно або періодично перебувають на об'єкті;
- умовна висота об'єкта (висота, яка визначається різницею позначок найнижчого рівня проїзду (установлення) пожежних автодрабин (автопідійомників) і підлоги верхнього поверху без урахування верхніх технічних поверхів, якщо на технічних поверхах розміщено лише інженерні обладнання та комунікації будинку);

- наявність та масштаб небезпечних подій, надзвичайних ситуацій, які сталися на об'єкті протягом останніх п'яти років, що передують плановому періоду;
- клас наслідків (відповідальності) під час будівництва об'єкта;
- кількість порушень вимог законодавства у сфері техногенної та пожежної безпеки, пов'язаних з експлуатацією або під час будівництва об'єкта та виявлених протягом останніх п'яти років, що передують плановому періоду.

2. Ризики настання негативних наслідків від провадження господарської діяльності у сфері техногенної та пожежної безпеки визначено в табл. 7.6.

3. Вичерпний перелік критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності у сфері техногенної та пожежної безпеки, їх показники та кількість балів за кожним показником визначено в табл. 7.7.

Таблиця 7.6 – Ризики настання негативних наслідків від провадження господарської діяльності у сфері техногенної та пожежної безпеки

Цілі державного нагляду (контролю) (код)	Ризик настання негативних наслідків від провадження господарської діяльності		Критерії, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність проведення планових заходів державного нагляду (контролю)
	подія, що містить ризик настання негативних наслідків	негативний наслідок	
1	2	3	4
Життя та здоров'я людини (01)	надзвичайна ситуація  пожежа  аварія	смерть людини  шкода здоров'ю людини	вид об'єкта (приміщення, будівля, споруда, будинок, територія), що належить суб'єкту господарювання на праві власності, володіння, користування (далі – об'єкт)  площа об'єкта
Інші суспільні інтереси (06)	надзвичайна ситуація        пожежа  аварія	збитки та моральна шкода, завдані власникам (користувачам) майна та/або третім особам	максимальна розрахункова (проектна) кількість людей, які постійно або періодично перебувають на об'єкті (відповідно до ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013 «Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва»)  умовна висота об'єкта (висота, яка визначається різницею позначок найнижчого рівня проїзду (встановлення) пожежних автодрабин (автопідйомників) і підлоги верхнього поверху без урахування верхніх технічних поверхів, якщо на технічних поверхах розміщено лише інженерні обладнання та комунікації будинку)



## Продовження тблиці 7.6

1	2	3	4
			<p>наявність та масштаб небезпечних подій, надзвичайних ситуацій, які сталися на об'єкті протягом останніх п'яти років, що передують плановому періоду</p> <p>клас наслідків (відповідальності) під час будівництва об'єкта (відповідно до Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності»)</p> <p>кількість порушень вимог законодавства у сфері техногенної та пожежної безпеки, пов'язаних з експлуатацією або під час будівництва об'єкта, та виявлених протягом останніх п'яти років, що передують плановому періоду</p>

Таблиця 7.7 – Перелік критеріїв, їх показників, кількості балів за кожним показником, шкали балів та періодичності проведення планових заходів державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки

Критерій, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність проведення планових заходів державного нагляду (контролю)	Показники критеріїв	Кількість балів
1	2	3
1. Вид об'єкта (приміщення, будівля, споруда, будинок, територія), що належить суб'єкту господарювання на праві власності, володіння, користування (далі – об'єкт)*	<p>1) об'єкт підвищеної небезпеки, визначений відповідно до Закону України «Про об'єкти підвищеної небезпеки»</p> <p>2) об'єкт державної власності, що має стратегічне значення для економіки і безпеки держави згідно з переліком, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 4 березня 2015 р. № 83 (Офіційний вісник України, 2015 р., № 20, ст. 555), та належить до:</p> <p>сфери оборони</p> <p>паливно-енергетичного комплексу</p> <p>транспортної галузі</p> <p>підприємств, що забезпечують розміщення і зберігання матеріальних цінностей державного резерву</p> <p>агропромислового комплексу</p>	<p>31</p> <p>33</p> <p>35</p> <p>21</p> <p>30</p> <p>25</p>

## Продовження тблиці 7.7

1	2	3
	сфери телекомунікацій та зв'язку авіаційної та ракетно-космічної промисловості машинобудівної промисловості металургійного комплексу хімічного комплексу наукової діяльності сфери стандартизації, метрології та сертифікації	20 30 20 22 31 10 12
	гідрометеорологічної діяльності промисловості будівельних матеріалів фінансово-бюджетної сфери харчової промисловості легкої промисловості поліграфії геологорозвідувальної галузі 3) об'єкти метрополітену 4) об'єкти, включені до Державного реєстру нерухомих пам'яток (відповідно до Закону України «Про охорону культурної спадщини»), які належать до пам'яток культурної спадщини: національного значення місцевого значення 5) об'єкти, які згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою» належать до: промислових, складських будівель (споруд), зовнішніх установок, які за категорією вибухопожежної безпеки відносяться до категорії «А», «Аз» або «Б», «Бз» промислових будівель (споруд), зовнішніх установок, які за категорією пожежної безпеки відносяться до категорій «В» та «Вз», площею до 1 тис. кв. метрів промислових будівель (споруд), які за категорією пожежної безпеки відносяться до категорії «В», площею від 1 тис. кв. метрів до 5 тис. кв. метрів промислових будівель (споруд), які за категорією пожежної безпеки відносяться до категорії «В», площею 5 тис. кв. метрів та більше складських будівель (споруд), які за категорією пожежної безпеки відносяться до категорії «В», площею до 5 тис. кв. метрів	14 21 15 18 20 16 16 28  30 10  36 5 15 36 5

## Продовження таблиці 7.7

1	2	3
	складських будівель (споруд), які за категорією пожежної небезпеки відносяться до категорії «В», площею від 5 тис. кв. метрів до 10 тис. кв. метрів	15
	складських будівель (споруд), які за категорією пожежної небезпеки відносяться до категорії «В», площею 10 тис. кв. метрів та більше	36
	б) об'єкти, які мають (експлуатують) підземні, цокольні та/або підвальні поверхи (крім тих, де розміщено лише інженерне обладнання та комунікації)	10
2. Площа об'єкта	1) до 300 кв. метрів включно 2) від 300 кв. метрів до 2000 кв. метрів включно 3) понад 2000 кв. метрів до 7500 кв. метрів включно 4) понад 7500 кв. метрів до 20000 кв. метрів включно 5) понад 20000 кв. метрів	1 13 21 26 31
3. Максимальна розрахункова (проектна) кількість людей, які постійно або періодично перебувають на об'єкті (відповідно до ДСТУ-НБ В.1.2-16:2013 «Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва»)*	1) постійне перебування до 50 осіб 2) постійне перебування від 50 до 400 осіб 3) постійне перебування понад 400 осіб 4) періодичне перебування до 100 осіб 5) періодичне перебування від 100 до 1000 осіб 6) періодичне перебування понад 1000 осіб	5 10 15 5 10 15
4. Умовна висота об'єкта (висота, яка визначається різницею позначок найнижчого рівня проїзду (встановлення) пожежних автодрабин (автопідйомників) і підлоги верхнього поверху без урахування верхніх технічних поверхів, якщо на технічних поверхах розміщено лише інженерні обладнання та комунікації будинку)	1) до 9 метрів 2) від 9 метрів до 26,5 метра включно 3) від 26,5 метра до 47 метрів включно 4) понад 47 метрів	5 10 20 30
5. Наявність та масштаб небезпечних подій, надзвичайних ситуацій, які сталися на об'єкті протягом останніх п'ять років, що передують плановому періоду*	1) загибель від 1 до 3 осіб 2) загибель 3 осіб та більше 3) травмування (втрата працездатності) від 1 до 5 осіб 4) травмування (втрата працездатності) 5 осіб та більше 5) завдання майнової шкоди у великому розмірі*** 6) завдання майнової шкоди в особливо великому розмірі*** 7) надзвичайна ситуація державного рівня	10 20 5 10 10 15 20

1	2	3
	8) надзвичайна ситуація регіонального рівня 9) надзвичайна ситуація місцевого рівня 10) надзвичайна ситуація об'єктового рівня 11) небезпечні події (надзвичайні ситуації) відсутні	15 10 5 0
6. Клас наслідків (відповідальності) під час будівництва об'єкта (відповідно до Закону України «Про регулювання містобудівної діяльності»)**	1) об'єкт зі значними наслідками (СС3) 2) об'єкт із середніми наслідками (СС2) 3) об'єкт із незначними наслідками (СС1)	41 21 11
7. Кількість порушень вимог законодавства у сфері техногенної та пожежної безпеки, пов'язаних з експлуатацією або під час будівництва об'єкта, та виявлених протягом останніх п'яти років, що передують плановому періоду*	1) порушень не виявлено 2) до трьох порушень, які були усунені у встановлений строк 3) від трьох до десяти порушень, які були усунені у встановлений строк 4) більше десяти порушень, які були усунені у встановлений строк 5) до трьох порушень, які не були усунені у встановлений строк 6) від трьох до десяти порушень, які не були усунені у встановлений строк 7) більше десяти порушень, які не були усунені у встановлений строк	0 1 3 5 10 20 25

\* Якщо об'єкт може бути одночасно віднесено до двох або більше показників критерію, застосовується показник із найбільшою кількістю балів.

\*\* Критерій застосовується виключно до об'єктів, що будуються.

\*\*\* Майнова шкода вважається заподіяною у великих розмірах, якщо прямі збитки становлять суму, яка в 300 і більше разів перевищує неоподатковуваний мінімум доходів громадян, а в особливо великих розмірах – якщо прямі збитки становлять суму, яка в 1000 і більше разів перевищує неоподатковуваний мінімум доходів громадян.

4. Віднесення суб'єкта господарювання до високого, середнього або незначного ступеня ризику здійснюється з урахуванням суми балів, нарахованих за всіма критеріями, визначеними в табл. 7.7, за такою шкалою:

- від 41 до 100 балів – високий;
- від 21 до 40 балів – середній;
- від 0 до 20 балів – незначний.

Якщо суб'єкту господарювання належить на праві власності, володіння або користування більше одного об'єкта, кількість балів нараховується за всіма критеріями, визначеними в табл. 7.7, окремо стосовно кожного об'єкта.

Стосовно об'єктів, що будуються, сума балів нараховується лише за критеріями 5–7, визначеними в табл. 7.7.

5. Планові заходи державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки здійснюються за діяльністю суб'єктів господарювання з такою періодичністю:

- з високим ступенем ризику – не частіше одного разу на два роки;
- із середнім ступенем ризику – не частіше одного разу на три роки;
- з незначним ступенем ризику – не частіше одного разу на п'ять років.

Якщо суб'єкту господарювання належить на праві власності, володіння або користування більше одного об'єкта, перевірка суб'єкта господарювання здійснюється з періодичністю, що залежить від суми балів, нарахованих окремо щодо кожного об'єкта.

6. У разі, коли за результатами останнього планового заходу державного нагляду (контролю) у суб'єкта господарювання не виявлено суттєвих порушень вимог законодавства у сфері техногенної та пожежної безпеки, наступна планова перевірка такого суб'єкта господарювання проводиться не раніше, ніж через установлений для відповідного ступеня ризику період, збільшений удвічі. Це положення не застосовується до суб'єктів господарювання, віднесених до високого ступеня ризику.

### **7.3 Загальна процедура побудови і оцінки дерева несправностей**

Для визначення складових техногенного ризику застосовують, як правило, *метод дерева несправностей*. Вказаний метод був розроблений Х. Уотсоном (Bell Telephone Laboratories) для аналізу надійності систем управління пуском ракети «Мінітмен». У подальшому метод був суттєво удосконалений Хааслом (Boeing Company). Широке визнання метод дерева несправностей отримав після двох симпозіумів, один з яких був присвячений безпеці систем і відбувся у 1965 р. в Університеті штату Вашингтон (м. Сіетл), а другий був організований Каліфорнійським університетом та цілком був присвячений зазначеного методу.

Розглянемо, перш за все, процедуру побудови та аналізу дерева несправностей.

Процедура побудови дерева несправностей включає, як правило, наступні етапи:

1. Визначення небажаної (завершальної) події у системі, що розглядається.
2. Ретельне вивчення можливої поведінки та передбачуваного режиму використання системи.
3. Визначення функціональних властивостей подій більш високого рівня для виявлення причин тих чи інших несправностей системи і проведення більш глибокого аналізу поведінки системи, з метою виявлення логічного взаємозв'язку подій більш низького рівня, здатних призвести до відмови системи.
4. Побудова дерева несправностей для логічно пов'язаних подій на вході. Ці події повинні визначатись у термінах ідентифікованих незалежних первинних відмов.

5. Щоб отримати кількісні результати для завершальної небажаної події дерева, необхідно задати ймовірність відмови, коефіцієнт неготовності, інтенси-

вність відмов, інтенсивність відновлення та інші показники, що характеризують первинні події, за умовою, що події дерева несправностей не є надлишковими.

Більш чіткий і систематичний аналіз передбачає виконання таких процедур, як визначення меж системи, побудова дерева несправностей, якісна оцінка, кількісна оцінка.

### 7.3.1 Визначення меж системи

Зазвичай система зображується у вигляді блок-схеми, що показує усі функціональні взаємозв'язки й елементи. При побудові дерева несправностей виключно важливої ролі набуває правильне завдання граничних умов, які не слід плутати із фізичними границями системи.

Однією з основних вимог, що висувається до граничних умов, є завдання завершальної небажаної події, встановлення якої потребує особливої ретельності, оскільки саме для неї як для основної відмови системи будується дерево несправностей. Для того, щоб аналіз був зрозумілий усім зацікавленим особам, дослідник повинен скласти перелік усіх припущень, що приймаються при визначенні системи і побудові дерева несправностей.

### 7.3.2 Побудова дерева несправностей

Основною метою побудови дерева несправностей є символічне представлення існуючих у системі умов, здатних викликати її відмову. Крім того, побудоване дерево дозволяє показати у явному вигляді слабкі місця системи і є наочним засобом подання та обґрунтування рішень, що приймаються, а також засобом дослідження компромісних співвідношень або встановлення ступеня відповідності конструкції системи заданим вимогам.

Зазвичай передбачається, що дослідник, перш ніж приступити до побудови дерева несправностей, ретельно вивчає систему. Тому опис системи повинен бути частиною документації, що складається у ході такого вивчення.

В залежності від конкретних цілей аналізу дерева несправностей, для побудови останнього спеціалісти з надійності зазвичай використовують або *метод первинних відмов*, або *метод вторинних відмов*, або *метод ініційованих відмов*.

*Метод первинних відмов.* Відмова елемента називається *первинною*, якщо вона відбувається у розрахункових умовах функціонування системи. Побудова дерева несправностей на основі урахування лише первинних відмов не становить великої складності, рскільки дерево будується лише до тієї точки, де ідентифіковані первинні відмови елементів викликають відмову системи.

Розглянемо приклад.

*Приклад 7.3.* Необхідно побудувати дерево несправностей для простої системи – кімнати, в якій є вимикач та електрична лампочка. Вважається, що відмова вимикача полягає лише у тому, що він не замикається, а завершальною подією є відсутність освітлення у кімнаті.

Дерево несправностей для цієї системи показано на рис. 7.1. Основними, або первинними, подіями дерева несправностей є (1) відмова джерела жи-

влення  $E_1$ , (2) відмова запобіжника  $E_2$ , (3) відмова вимикача  $E_3$  та (4) перегорання лампочки  $E_4$ .

Проміжною подією є припинення подачі електроенергії. Найбільший інтерес становить завершальна подія – «відсутність світла у кімнаті», тому саме їй приділяється основна увага під час аналізу. Дерево несправностей, яке зображене на рис. 7.1, показує, що вихідні події являє собою виходи схем АБО: у разі настання будь якого з чотирьох первинних подій  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,  $E_4$  здійснюється завершальна подія (відсутність світла у кімнаті).

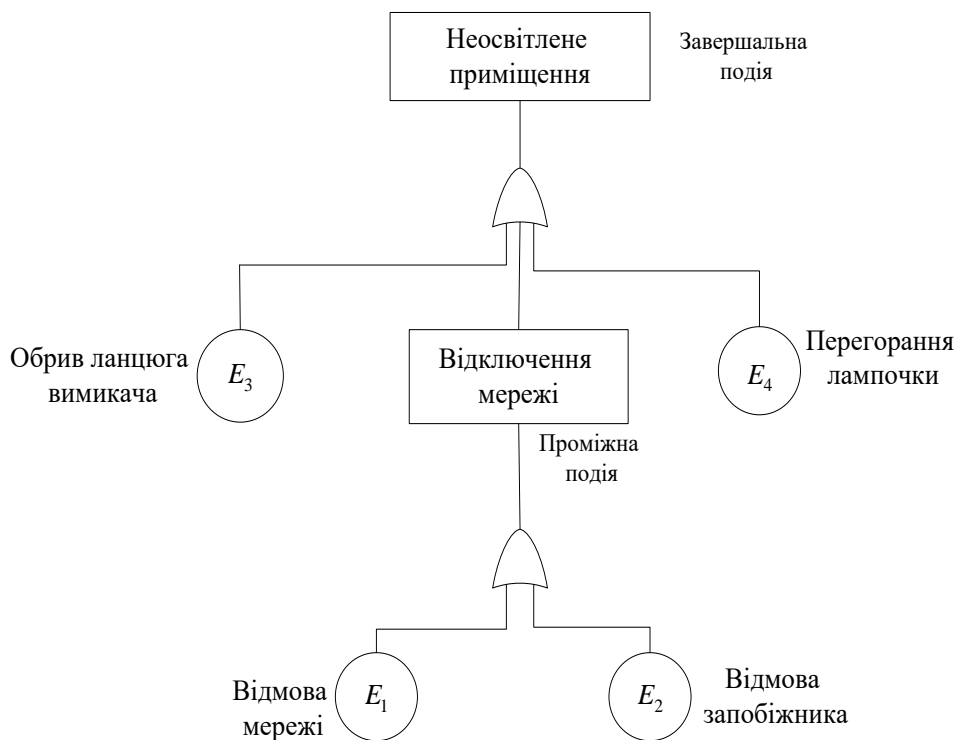
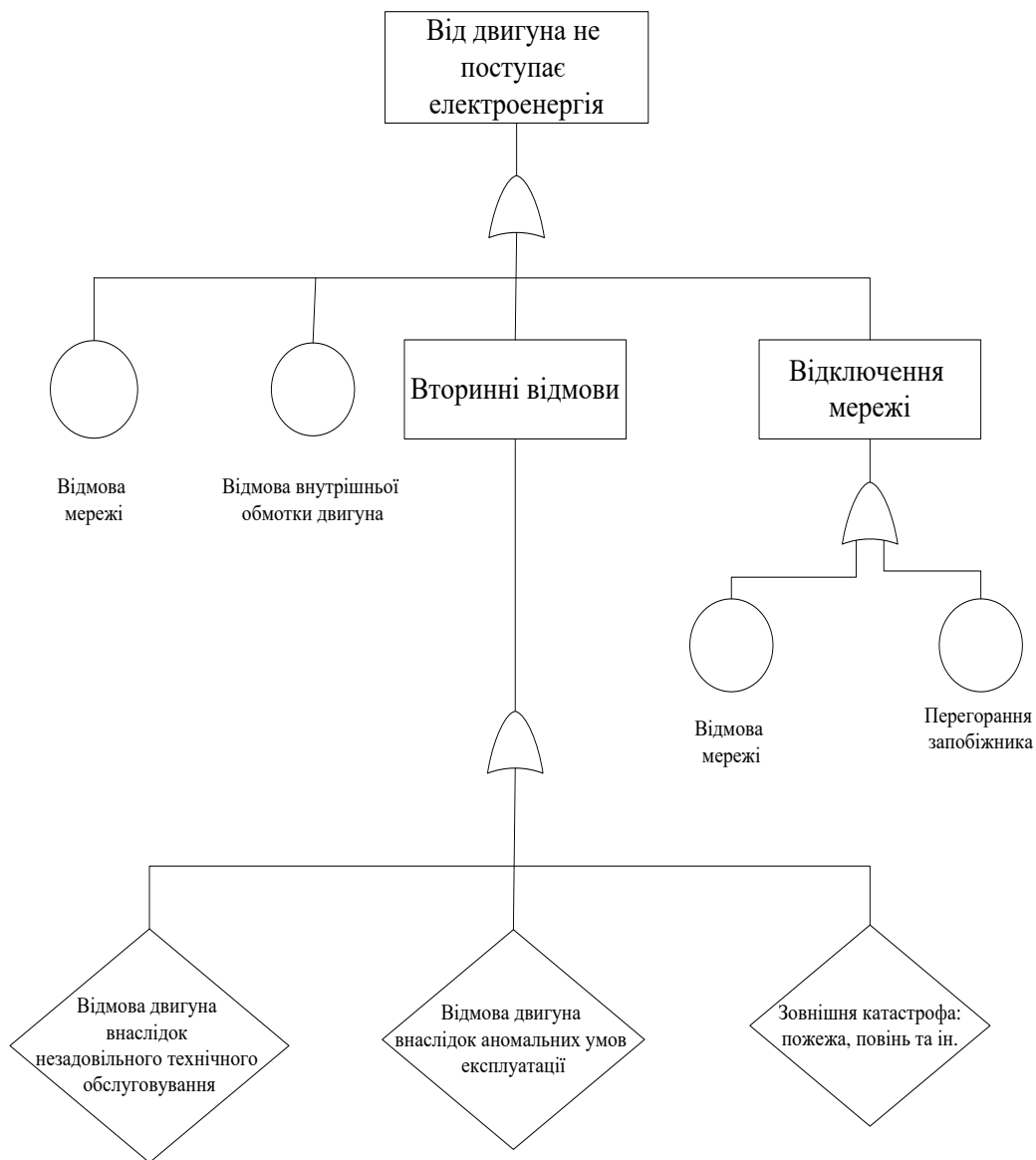


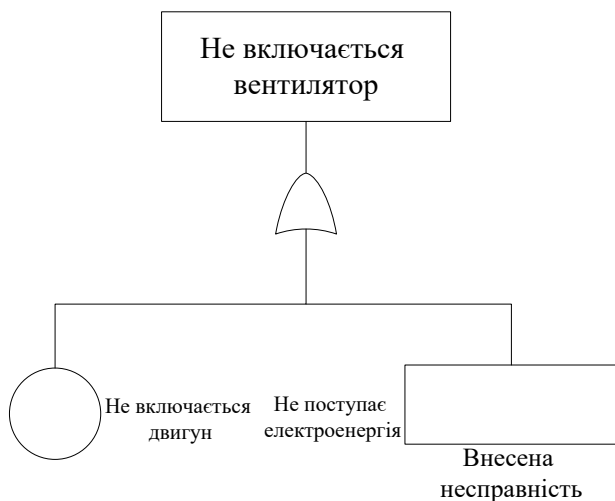
Рисунок 7.1 – Дерево несправностей для випадку первинних відмов

*Метод вторинних відмов.* Для того, щоб аналіз охоплював і вторинні відмови, потрібно більш глибоке дослідження системи. При цьому аналіз виходить за рамки розгляду системи на рівні відмов її постійних елементів, оскільки вторинні відмови викликаються несприятливим впливом навколишніх умов або надмірним навантаженням на елементи системи у процесі експлуатації.

*Приклад 7.4.* На рис. 7.2 показано дерево несправностей з завершальною подією «припинення вироблення електроенергії генератором». Дерево відмов відображає такі первинні події, як відмова вимикача (відсутність замикання), несправності внутрішніх ланцюгів двигуна, джерела живлення та запобіжника. Вторинні відмови зображуються прямокутником як проміжна подія. Вторинні відмови, зображені на рис. 7.2, відбуваються внаслідок незадовільного технічного обслуговування, несприятливого впливу зовнішнього середовища, стихійного лиха та ін.



**Рисунок 7.2 – Дерево несправностей на випадок вторинних відмов**



**Рисунок 7.3 – Дерево несправностей для випадку основних та ініційованих відмов**

*Метод ініційованих відмов.* Подібні відмови виникають при правильному використанні елемента, але у невстановлений час або у недозволеному місці. Іншими словами, ініційовані відмови – це збої операцій координації подій на різних рівнях дерева несправностей: від первинних відмов до завершальної події (небажаної або кінцевої). Типовим прикладом ініційованої відмови є надходження помилкового сигналу на будь-який електротехнічний пристрій (наприклад,



двигун або перетворювач). Взаємозв'язок між основними та ініційованими відмовами показано на рис. 7.3.

### 7.3.3 Якісна оцінка дерева несправностей

Підхід, що викладається нижче, оснований на використанні так званих мінімальних перерізів дерева несправностей. Переріз визначається як множина елементарних подій, що призводять до небажаного результату. Якщо із множини подій, що належать деякому перерізу, неможливо виключити жодної та у той же час ця множина подій призводить до небажаного результату, то у цьому випадку говорять про наявність *мінімального перерізу*. Виявлення мінімальних перерізів є виснажливим заняттям, тому для їх знаходження потрібна комп'ютерна реалізація. Приклад якісної оцінки дерева несправностей представлений на рис. 7.4.

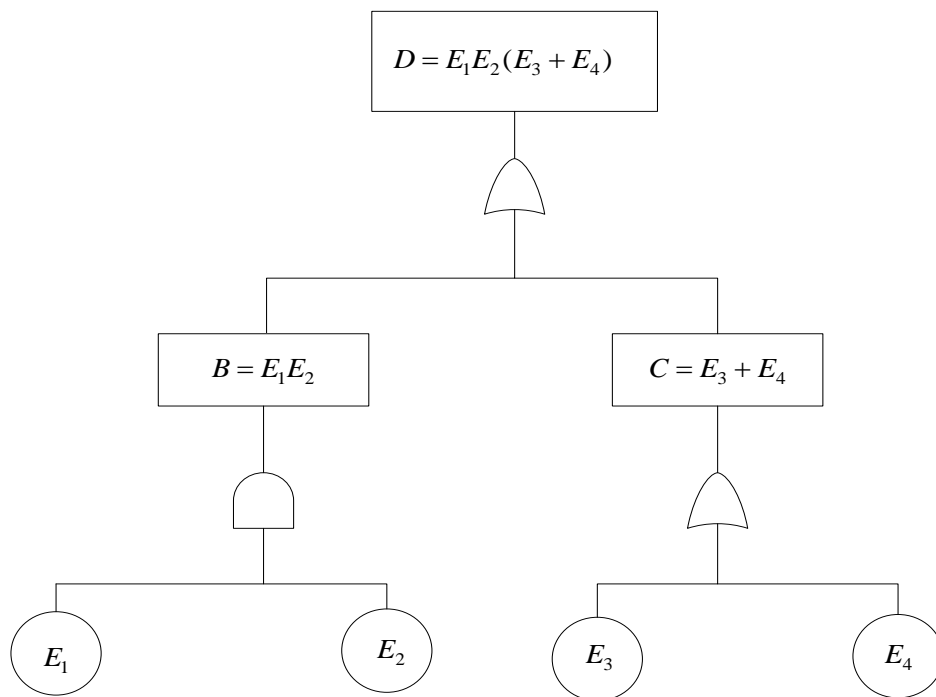


Рисунок 7.4 – Дерево несправностей для гіпотетичного випадку

Проміжна відмова  $B$  може з'явитись тільки у тому випадку, коли мають місце обидві події  $E_1$  та  $E_2$ . Що стосується проміжної події  $C$ , то вона може відбутись при появі події  $E_3$  або  $E_4$ . Завершальна подія настає тільки в разі одночасної появи проміжних подій  $B$  та  $C$ .

### 7.3.4 Кількісна оцінка дерева несправностей

Подібна оцінка проводиться на основі інформації про такі кількісні показники надійності для завершальної події, як ймовірність відмови, інтенсивність відмов або інтенсивність відновлень. Спочатку розраховують показники надійності елемента, потім знаходять критичний шлях і, нарешті, оцінюють завершальну подію.

Кількісна оцінка дерева відбувається або за допомогою статистичного моделювання, або аналітичним методом.

У першому випадку дерево несправностей моделюється на комп'ютері зазвичай для декількох тисяч або навіть мільйонів циклів функціонування системи. При цьому основними етапами моделювання є:

- завдання показників надійності для елементарних подій;
- представлення всього дерева несправностей на комп'ютері;
- складання переліку відмов, що призводять до завершальної події, та переліку відповідних мінімальних перерізів;
- обчислення потрібних кінцевих результатів.

У другому випадку використовуються існуючі аналітичні методи.

#### 7.4 Дерево несправностей з подіями, що повторюються. Алгоритм знаходження мінімальних перерізів

Характерна конфігурація такого дерева несправностей показана на рис. 7.5.

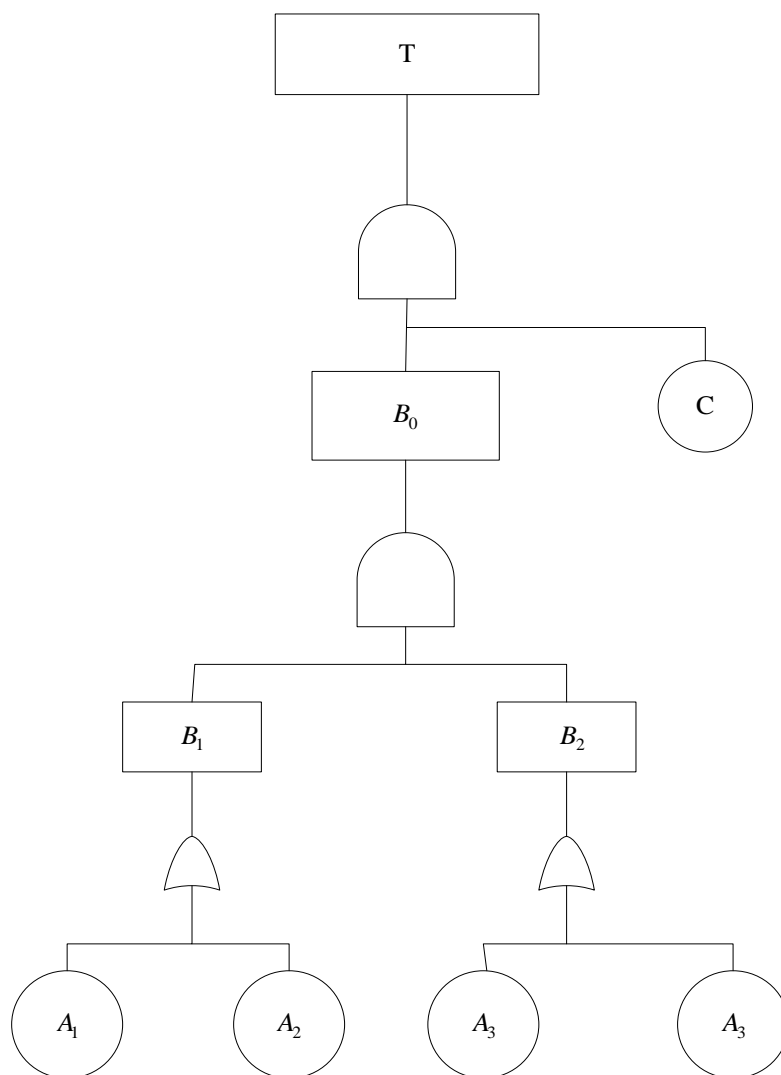


Рисунок 7.5 – Дерево відмов у випадку подій, що повторюються

У цьому випадку дерево несправностей можна представити за допомогою наступних булевих виразів:

$$\begin{aligned} T &= C \cdot B_0, & B_1 &= A_1 + A_2, \\ B_0 &= B_1 \cdot B_2, & B_2 &= A_1 + A_3. \end{aligned}$$

Підставляючи до першого виразу співвідношення для  $B_0$ ,  $B_1$  та  $B_2$ , отримуємо

$$T = C \cdot (A_1 + A_2) \cdot (A_1 + A_3).$$

Згідно рис. 7.5, відмова  $A_1$  є елементарною подією, що повторюється, тому отриманий вираз необхідно спростити, використовуючи розподільчий закон булевої алгебри.

У результаті отримуємо

$$T = C \cdot [A_1 + A_2 \cdot A_3],$$

при цьому початкове дерево несправностей (рис. 7.5) набуває вигляду, що показаний на рис. 7.6

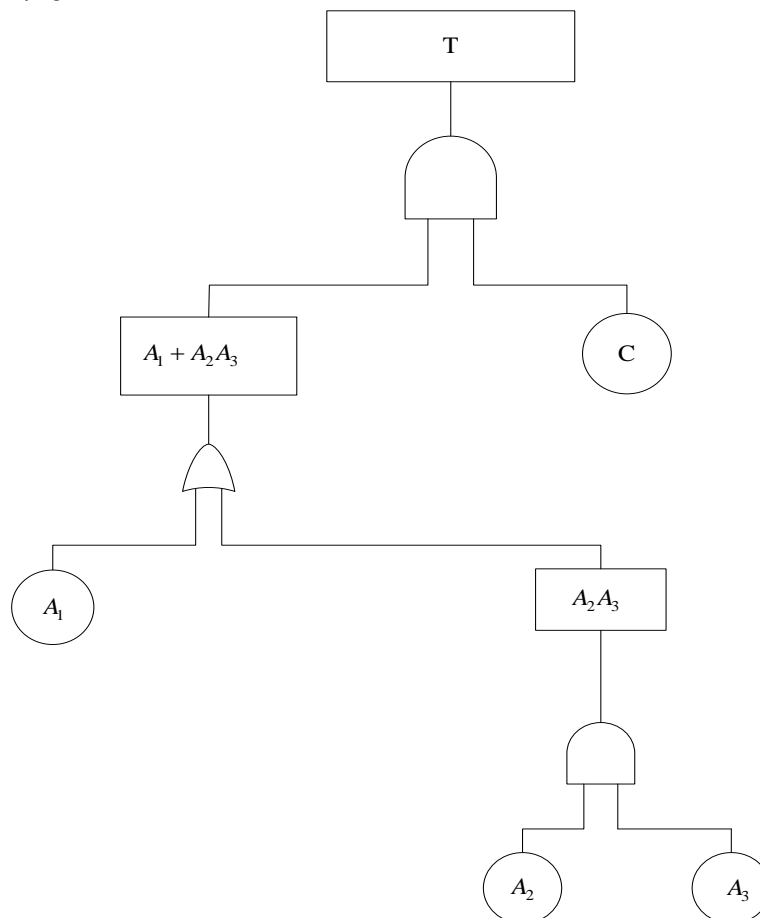


Рисунок 7.6 – Спрощене дерево несправностей

Таким чином, перш ніж знаходити кількісні показники надійності, слід спростити вирази з подіями, що повторюються, використовуючи властивості булевої алгебри, інакше будуть отримані помилкові кількісні оцінки. У літературі описані різні алгоритми побудови дерева несправностей із подіями, що повторюються. Розглянемо один з таких алгоритмів.

#### 7.4.1 Алгоритм знаходження мінімальних перерізів

Спочатку введемо поняття *перерізу* та *мінімального перерізу*.

*Переріз* – це сукупність основних подій, здійснення яких викликає настання завершальної події.

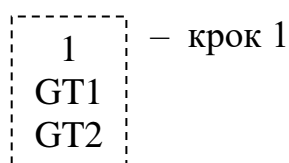
*Переріз* називається *мінімальним*, якщо кількість подій, що йому належать, не може бути зменшеною та вона, як і раніше, призводить до настання завершальної події.

У випадку простих дерев розглянутий алгоритм може бути використаний для ручного розрахунку. Однак для складних дерев із сотнями логічних схем і елементарних подій необхідно використати комп'ютер.

Алгоритм, що пропонується, є дуже ефективним. Він враховує той факт, що схема ТА завжди збільшує розмірність перерізу, а схема АБО збільшує кількість перерізів.

*Приклад 7.5.* Звернемось до дерева несправностей, приведеного на рис. 7.7. Робота алгоритму починається з логічного вузла GT0, що зображений під прямокутником, який відповідає завершальній події. Як впливає з вищесказаного про дерева несправностей, логічний вузол завершальної події може бути або схемою ТА, або схемою АБО.

Однак якщо логічний вузол кінцевої події GT0 є схемою АБО, то кожен її вхід відповідає елементу певного рядка матричного списку. У той же час у випадку схеми ТА кожен вхід є елементом деякого стовпця матричного списку. Наприклад, логічний вузол кінцевої події GT0 є схемою АБО, тому складання матричного списку починається із запису подій на вході схем GT1 та GT2 (вихідних подій) в одному стовпці, але у різних рядках (крок 1).



Будь-яка подія на вході схеми АБО викликає появу події на її виході. Тому події на вході схеми GT0 є елементами окремих перерізів.

При використанні цього методу застосовується просте правило, що складається із заміни кожної логічної схеми подіями на її вході. Входи можуть бути виходами логічних схем або елементарними подіями, поки всі логічні схеми дерева несправностей не будуть замінені елементарними подіями. На цьому складання матричного списку завершується.

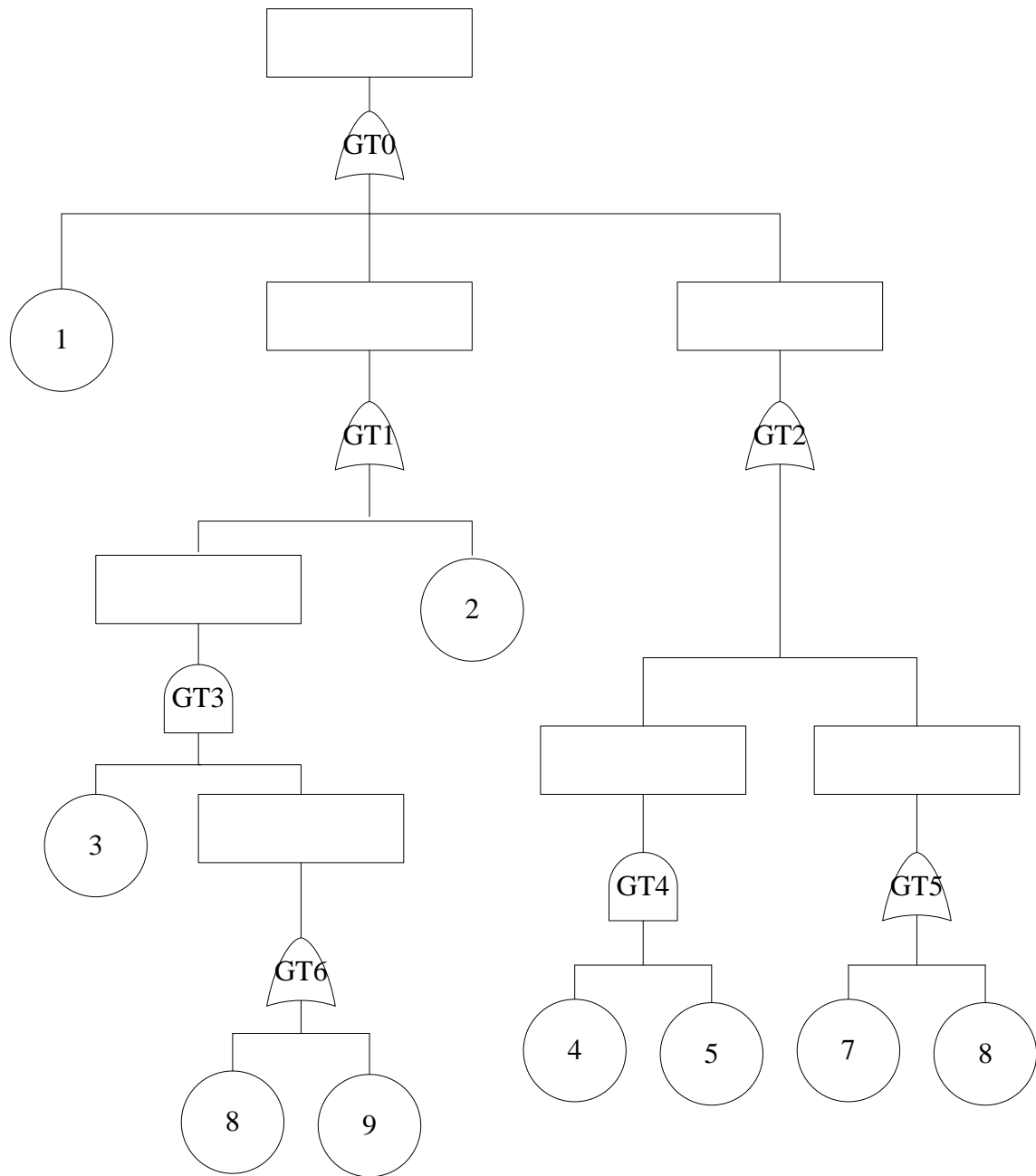
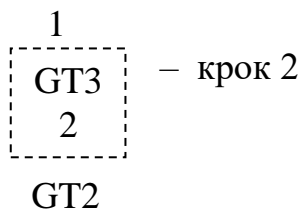
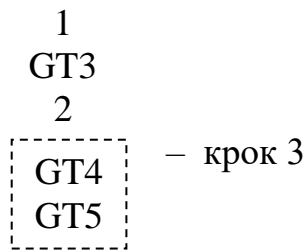


Рисунок 7.7 – Дерево подій

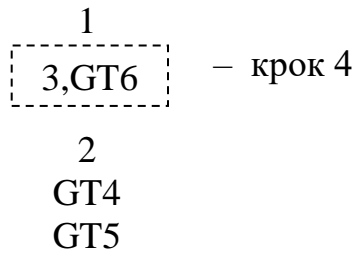
Щоб отримати завершений матричний список, замінюємо схему АБО GT1 подіями на її вході, які записуються в окремі рядки, як показано нижче (крок 2):



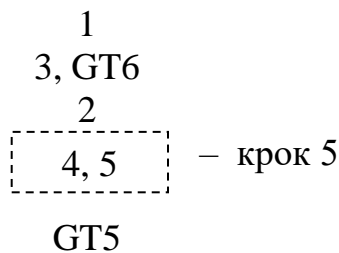
Аналогічно замінюємо схему GT2 подіями на її вході (крок 3):



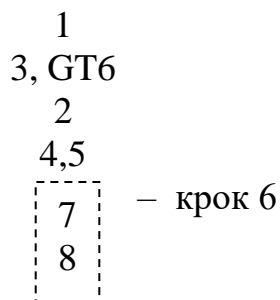
Так само чинимо і зі схемою GT3, але оскільки ця схема ТА, вона замінюється подіями на її вході (крок 4):



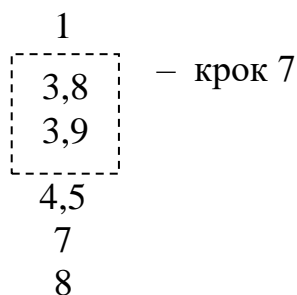
Аналогічно схема GT4 замінюється подіями на її вході (крок 5):



Оскільки схема GT5 є схемою АБО, вона замінюється вхідними подіями 7, 8 (крок 6):



Вузол GT6 також являє собою схему АБО, яка замінюється подіями 8 та 9 на її вході (крок 7):



Як бачимо, з цього матричного списку, переріз 8 містить єдину подію. Тому, виключаючи переріз {3, 8}, отримуємо наступні мінімальні перерізи:

- 1
- 2
- 7
- 8
- 3,9
- 4,5

Якщо в матричному списку немає подій, що повторюються, то перерізи, які отримані цим методом, будуть мінімальними. У протилежному випадку виключаються всі не мінімальні перерізи (тобто що містять інші множини) із остаточного матричного списку.

Приведене дерево несправностей для отриманого вище матричного списку зображено на рис. 7.8; при цьому воно не містить подій, що повторюються.

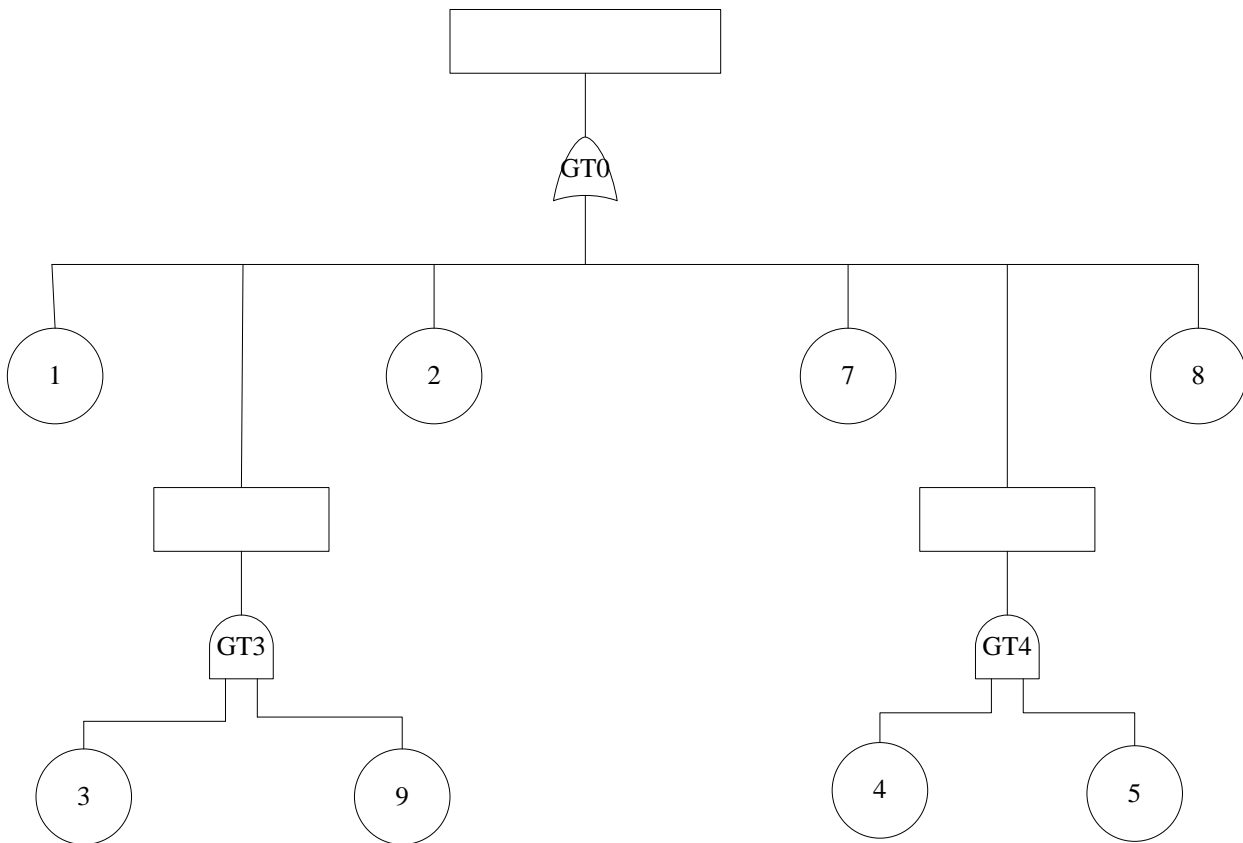


Рисунок 7.8 – Приведене дерево несправностей

### 7.4.2 Подвійність дерева несправностей

Зазвичай поява завершальної події являє собою інтерес з точки зору забезпечення безпеки системи, а її відсутність – з точки зору гарантії надійності системи. Оскільки «поява» та «не поява» завершальної події – дві сторони

одного й того ж процесу, за допомогою дерева несправностей легко отримати дерево справних станів. Для цього у вихідному дереві несправностей достатньо замінити всі схеми ТА схемами АБО або навпаки. Крім цього, завершальна, проміжні та елементарні події (відмови) повинні бути замінені відповідними подвійними подіями (сприятливими результатами). Іншими словами, якщо завершальною подією є «відсутність світла у кімнаті», то її потрібно замінити подією «кімната освітлена».

Мінімальні перерізи початкового дерева несправностей будуть мінімальними шляхами подвійного дерева (дерева справних станів). Шлях можна визначити як множину основних подій, відсутність яких сприяє появі завершальної події. Мінімальний шлях визначається як множина, що не скорочується, яка ще зберігає характеристики шляхів, що їй належать. Для знаходження мінімальних шляхів подвійного дерева може бути застосований розглянутий у попередньому розділі алгоритм отримання мінімальних перерізів дерева несправностей.

## 7.5 Ймовірнісна оцінка дерева несправностей

Після отримання мінімальних перерізів або подій, що не повторюються, можна приступати до обчислення ймовірності настання завершальної події. Однак, перш за все, доцільно розглянути основні поняття теорії ймовірності стосовно логічних схем.

### 7.5.1 Схема АБО

Для пояснення ймовірнісного аспекту роботи цієї схеми проаналізуємо схему АБО з двома входами, зображену на рис. 7.9. Для цієї схеми ймовірність появи завершальної події має вигляд:

$$P(T) = P(a) + P(b) - P(a \cdot b).$$

Якщо  $a$  та  $b$  – статистично незалежні події та добуток  $P(a)P(b)$  дуже малий, то отриманий вираз можна наближено записати як:

$$P(T) \approx P(a) + P(b).$$

У випадку схеми АБО з  $n$  входами маємо:

$$P(a+b+c+\dots) \approx P(a) + P(b) + P(c) + \dots$$

Цей наближений вираз надає добрі результати, якщо ймовірності появи елементарних подій  $P(a)$ ,  $P(b)$ ,  $P(c)$ ,... дуже малі, а також точний результат, якщо події  $a, b, c, \dots$  є несумісними.



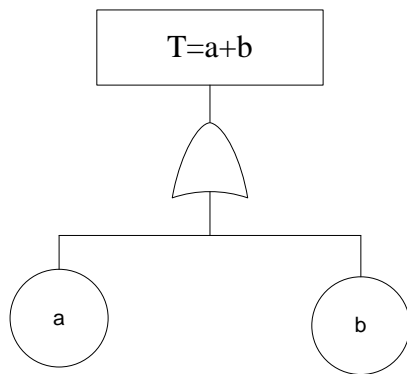


Рисунок 7.9 – Схема АБО з двома входами

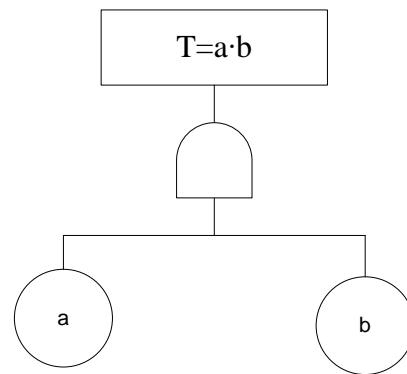


Рисунок 7.10 – Схема ТА з двома входами

### 7.5.2 Схема ТА

У випадку схеми ТА з двома входами (рис. 7.10) події  $a$  та  $b$  є статистично незалежними і для отримання ймовірності появи завершальної події застосовується правило множення ймовірностей:  $P(ab)=P(a) \cdot P(b)$ .

Для схеми ТА з  $n$  входами даний вираз можна записати у загальному вигляді:

$$P(a \cdot b \cdot c \cdot \dots) = P(a) \cdot P(b) \cdot P(c) \cdot \dots$$

### 7.6 Оцінка інтенсивності відмов за деревом несправностей

розглянемо спосіб визначення інтенсивності відмов для завершальної та проміжних подій дерева несправностей. Для цього зробимо попередньо наступні припущення:

- елементи системи (що відповідають елементарним подіям) не відновлюються;
- розподіл моментів появи подій (або моментів виникнення відмов елементів) підпорядковується експоненційному закону;
- дерево несправностей не має збитковості, тобто не містить подій, що повторюються;
- елементарні події (відмови елементів) є статистично незалежними.

Вирази для інтенсивності відмов логічних схем АБО й ТА дерева несправностей виводяться за допомогою відношення:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt},$$

де  $\lambda(t)$  – інтенсивність відмов у момент часу  $t$ ;  $R(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи елемента або системи.

### 7.6.1 Схема АБО

В логічному плані ця схема відповідає системі з послідовним з'єднанням елементів. Ймовірність безвідмовної роботи такої системи можна визначити за допомогою виразу:

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i,$$

де  $R_S$  – ймовірність безвідмовної роботи системи з послідовним з'єднанням елементів;  $R_i$  – стала, що характеризує ймовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента;  $n$  – кількість елементів.

При експоненційному розподілі наробітку до відмови цей вираз набуває вигляду:

$$R_S(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right),$$

де  $\lambda_i$  – постійна інтенсивність відмов  $i$ -го елемента;  $t$  – час. Тоді для інтенсивності відмов системи з послідовним з'єднанням елементів маємо:

$$\lambda_S(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i.$$

Із отриманого виразу випливає, що подія на виході схеми АБО являє собою суму подій на її вході.

### 7.6.2 Схема ТА

В логічному плані схема ТА відповідає системі з паралельним з'єднанням елементів. Ймовірність безвідмовної роботи такої системи:

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i),$$

де  $R_i$  – ймовірність безвідмовної роботи  $i$ -го елемента;  $n$  – кількість елементів.

У випадку постійної інтенсивності відмов елементів цей вираз набуває вигляду:

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - e^{-\lambda_i t}),$$

де  $\lambda_i$  – постійна інтенсивність відмов  $i$ -го елемента;  $t$  – час.

Після відповідної підстановки отримуємо:

$$\lambda_p(t) = \left\{ \sum_{j=1}^n \lambda_j (z_j - 1) \right\} \left\{ \prod_{j=1}^n z_j - 1 \right\}^{-1},$$

де  $1/z_j = (1 - e^{-\lambda_j t})$  для  $j = \overline{1, n}$ .

Якщо подія на виході однієї схеми ТА є вихідною подією іншої схеми ТА, то інтенсивності відмов для усіх проміжних та завершальної подій можна визначити через імовірності безвідмовної роботи відповідних елементів. Іншими словами, інтенсивність відмов, що характеризує подію на виході схеми ТА, не можна використовувати для опису виходу іншої схеми ТА.

У випадку послідовного з'єднання двох або більшої кількості схем ТА спочатку слід визначити ймовірність безвідмовної роботи на рівні виходу кожної логічної схеми, а потім, використовуючи вираз для  $\lambda_p(t)$ , визначити інтенсивності відмов.

## 7.7 Основи управління ризиком

### 7.7.1 Необхідність та можливість управління ризиками у соціотехноприродних системах

Наявність загроз в усіх сферах життєдіяльності людини і суспільства, їх реалізація у різноманітних формах та пов'язані з ними втрати потребують для забезпечення безпеки населення, існування та розвитку організацій, стабільності суспільного відтворення, сталого розвитку людства в соціотехноприродній системі вироблення механізмів зниження ризиків до прийняттого рівня у конкретних соціально-економічних умовах.

Необхідність вирішення вічної проблеми безпеки шляхом управління ризиками вийшла на перший план у наш час за рахунок двох основних причин: по-перше, у зв'язку із системною кризою цивілізації та усвідомленням світовим співтовариством глобальних небезпек для людства при збереженні сучасних тенденцій розвитку, результати яких значною мірою є невизначеними; по-друге, у зв'язку з усуненням у процесі соціально-економічного розвитку небезпек, що раніше часто реалізувались, і підвищенням чутливості населення до небезпек, що вже рідко реалізуються та яким раніше не надавали значення.

*Підвищення вимог до безпеки життєдіяльності.* Зі зростанням економічних можливостей суспільства в розвинених країнах зростає ступінь задоволення всіх груп потреб населення – якості життя, безпеки життєдіяльності, соціальних потреб. Одночасно з цим зростає ступінь неприйняття населенням небезпек, що рідко реалізуються, зі значним збитком. Тому висувуються підвищені вимоги не тільки до якості життя, а й безпеки життєдіяльності.

До цього часу, принаймні у розвинених країнах, масовий прояв небезпеки у вигляді майже детермінованого і досить передбачуваного нанесення

шкоди внаслідок різних природних, техногенних і соціальних процесів і явищ може бути практично виключено завдяки існуючим технологіям, а також застосуванню соціально-економічної й технічної систем безпеки. До масових проявів небезпеки з незначним збитком пристосувалися, включивши неминучі (що виявляються з імовірністю, близькою до одиниці) втрати, наприклад, в ціну виробленої продукції. Збереглися, одночасно ставши неприйнятними для сучасного суспільства, прояви небезпек і загроз у вигляді досить рідкісних негативних подій зі значним збитком. З'явилися і нові небезпеки, наприклад терористична. Небезпеки, що рідко реалізуються, зі значним збитком оцінюються ризиком, а для забезпечення безпеки по відношенню до них необхідно цим ризиком управляти. Управління ризиком виникло на певному етапі, коли соціально-економічний розвиток суспільства досяг такого рівня, що управління ризиком стало економічно і соціально виправданим.

*Необхідність впровадження на всіх рівнях систем управління ризиками.* Концепції розвитку в умовах ризику отримали значний розвиток у другій половині ХХ ст. завдяки розробці теорій, що відносяться до складних відкритих систем – теорій катастроф; біфуркацій; ансамблів; хаосу і т.п. Вони відносяться насамперед до фізичних, хімічних, біологічних і екологічних систем. Однак усе більше усвідомлюється застосування цих теорій до потреб розвитку соціоприродних, техносоціальних і соціально-економічних систем. Ідеї про нестабільність та флуктуації починають проникати в соціальні науки. Людське суспільство являє собою надзвичайно складну систему, здатну зазнавати величезної кількості біфуркацій, що підтверджується наявністю безлічі культур, які склалися протягом порівняно короткої історії людства. Встановлено, що складні системи мають високу чутливість до флуктуацій. Безлад і хаос, невизначеність та непередбачуваність, зіткнення інтересів і конкуренція, тимчасовість і постійні зміни – це загальний закон природи. І в цій обстановці людина повинна навчитися виживати. Число факторів ризику для людини в наш час збільшилася.

*Можливість управління ризиками.* Ризик як складний феномен має об'єктивну і суб'єктивну складові. Можливість управління ризиком пов'язана з наявністю об'єктивної складової.

### **7.7.2 Структура, рівні та механізми управління ризиками**

Управління ризиком у різних сферах життєдіяльності людини, існування та розвитку організацій в інтересах забезпечення прийнятної безпеки на існуючому рівні соціально-економічного розвитку є предметом теорії ризику і безпеки. Ризики пов'язані з властивістю невизначеності процесів, що відбуваються у світі, і можливістю досить рідкісної й непередбачуваної у просторі та часі реалізації об'єктивно існуючих небезпек. Ризик існує скрізь, де є невизначеність майбутнього і можливість заподіяння шкоди або недоотримання очікуваної вигоди. Чим більше невизначеність майбутнього, тим вище ризик. Ризик – це неминуча реальність для всіх, тому потрібно управляти ним в інтересах подальшого підвищення безпеки. Стосовно до ризиків, що виникають

у природі, техносфері, суспільстві, економіці і політиці, це можливо в різних ступенях.

Управління ризиком полягає у завчасному виявленні пов'язаних з ризиком небезпек, впливаючих чинників та прийнятті заходів щодо зниження ризику шляхом цілеспрямованої зміни цих факторів з урахуванням ефективності вжитих заходів. Управління ризиком включає систему заходів, здійснюваних як до прояву негативної події, так і після її реалізації.

Таким чином, під терміном «управління ризиком» розуміють розробку та обґрунтування оптимальних програм діяльності, покликаних ефективно реалізувати рішення в сфері забезпечення безпеки. Головний елемент такої діяльності – процес оптимального розподілу обмежених ресурсів на виключення або зниження різних видів ризику, з метою досягнення такого рівня безпеки населення, організацій та навколишнього середовища, який тільки можливий з урахуванням економічних і соціальних факторів.

Управління ризиком включає вирішення наступних основних задач:

- аналіз ризику;
- обґрунтування і прийняття рішень в умовах невизначеності та ризику;
- реалізація заходів щодо зниження ризику (забезпечення безпеки);
- комунікація ризику.

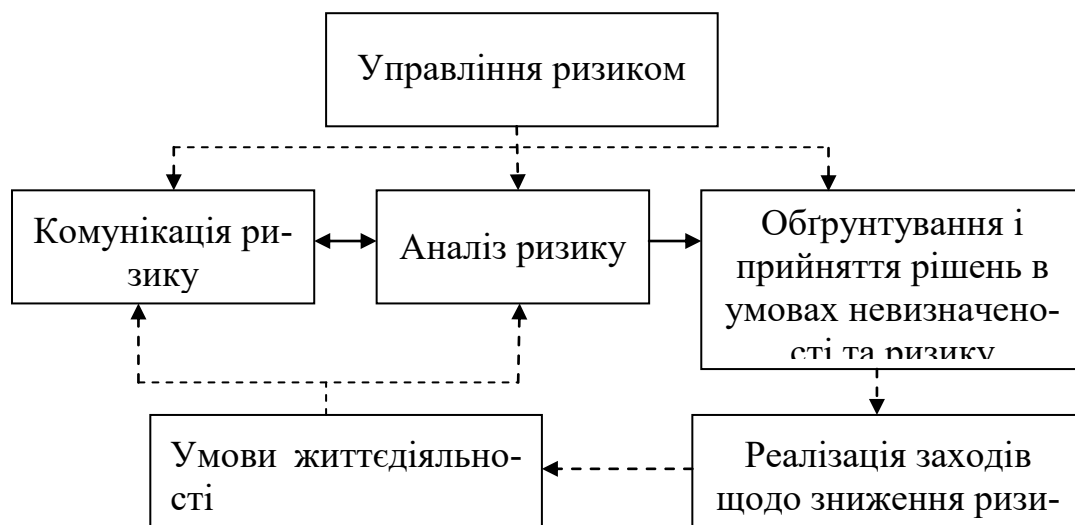


Рисунок 7.11 – Схема управління ризиком для життєдіяльності

Ключовим етапом, інформаційною основою управління ризиком є його *аналіз*. Змістом аналізу є дослідження, що впливають на результат діяльності ризикоутворюючих факторів. На основі аналізу ризику обґрунтовують і реалізують заходи щодо його зниження (усунення небезпек і загроз, захист, забезпечення безпеки), які полягають у цілеспрямованому впливі на ризикоутворюючі фактори.

Практично важливим для прийняття пов'язаних із ризиком рішень є його *комунікація*, тому що для реалізації пов'язаних із ризиком проєктів недостатньо наукових оцінок ризику.

Ефективно управляти ризиком неможливо без урахування психологічних і соціальних аспектів сприйняття та прийнятності ризику людиною і суспільством, конструктивної взаємодії з громадськістю.

Управління ризиком має бути відображено у структурі та функціях органів влади на всіх рівнях соціальної організації суспільства. Відсутність такого управління означатиме невідповідність державного управління реаліям сучасних небезпек, загроз і ризиків для життєдіяльності, може призводити до накопичення протиріч, що стримують соціальний розвиток суспільства і сприяють створенню об'єктивних умов для кризи. Розглядають такі рівні управління ризиками за масштабом:

- людина – індивідуальні ризики;
- організації (ризик-менеджмент) – господарські (фінансові, еколого-економічні та ін.) ризики для стабільного функціонування організації;
- сфери життєдіяльності суспільства (органи виконавчої влади, спеціально уповноважені забезпечувати і регулювати безпеку) – ризики особистості, суспільства і держави в соціальній, техногенній, екологічній та інших сферах;
- держава (вищі органи державної влади) – стратегічні ризики для національної безпеки країни;
- світове співтовариство (міждержавні органи, державні уряди) – глобальні ризики для сталого розвитку людства.

Зрозуміло, що системні кризи, які викликають катастрофи і лиха в соціальній сфері, виникають внаслідок накопичення кількісних і назрівання якісних переходів у соціальних, природних і технічних системах. Їх негативні наслідки можуть бути компенсовані лише своєчасним і адекватним удосконаленням соціальної організації суспільства і технологій захисту.

Людство підходить до розуміння того, що обраний шлях розвитку цивілізації як суспільства споживання вичерпав себе і веде людство в безвихідь. Подальший рух вперед можливий лише при зміні концепції розвитку, виборі виправданих, з точки зору сталого розвитку, цілей, а отже й урахуванні при стратегічному управлінні не тільки політико-економічних критеріїв, але і вимог безпеки людини, суспільства, навколишнього середовища.

Безпека територій (населення та організацій) також досягається управлінням відповідними ризиками (природними, техногенними, економічними, екологічними та ін.). Управління ризиками стосується кожної людини.

Можна виділити три механізми діяльності, спрямованої на зниження ризиків, тобто управління ризиками (табл. 7.8):

- *урахування ризику в діяльності* (прийняття розумних обережностей), яке здійснюється на основі принципу виправданого ризику на побутовому рівні кожною людиною. Необхідно мати на увазі, що поведінка більшості людей, попереджених про небезпеку, значно відрізняється від поведінки тієї ж людини в тій же обстановці, але не попередженої про небезпеку. І успіх організації також сильно залежить від зусиль з інформування та навчання співробітників різним аспектам життя та ділової активності в умовах ризику;

– *регулювання* ризиків виконується відповідно до принципу нормування на державному рівні спеціально уповноваженими (зазвичай постановою уряду) органами виконавчої влади. Регулювання ризиків може також здійснюватися саморегульованими організаціями (наприклад, професійних учасників ринку цінних паперів);

– *управління* ризиком, що реалізовується на основі принципів *обґрунтування та оптимізації*. На державному рівні управління ризиком здійснюють спеціально уповноважені органи виконавчої влади. На рівні фірми управління виконують спеціальні інститути фахівців (зокрема, ризик-менеджери). Перехід до управління ризиком виправданий за наявності методик, що дозволяють проводити моніторинг необхідних для прийняття рішень показників ризику у відповідній системі.

Таблиця 7.8 – Характеристика механізмів управління ризиками

Механізм	Принцип	Суб'єкт управління
Урахування в діяльності	Виправданого ризику	Кожна людина
Регулювання	Нормування (неперевищення рівня прийнятного ризику або граничних рівнів негативних факторів)	Органи виконавчої влади, що уповноважені здійснювати регулювання у відповідній сфері; саморегульовані організації
Управління	Обґрунтування (критерій «витрати-вигоди»); оптимізації	Органи виконавчої влади, що уповноважені здійснювати регулювання у відповідній сфері; ризик-менеджери

### 7.7.3 Процес управління ризиками

Управління як цілеспрямований вплив керуючої системи на керовану проявляється у вигляді множини взаємопов'язаних процесів (етапів) підготовки, прийняття та організації виконання управлінських рішень, складових технології процесу управління, яка схематично представлена на рис. 7.12.

1. *Визначення параметрів наявної або ситуації, що планується.* Цей процес оснований на зборі та обробці даних за факторами, що впливають на ризик. Інформація відіграє ключову роль у процесі управління ризиками. Своєчасне надання особі, що приймає рішення (ОПР), всієї необхідної інформації дозволяє знизити невизначеність у процесі прийняття рішення і, отже, втрати від помилкових рішень. До інформації висувають такі основні вимоги:

– повнота, оскільки відсутність повної інформації є одним з істотних факторів ризику, а прийняття рішень у цих умовах служить причиною додаткових втрат;

– достовірність (або точність), для забезпечення якої інформація повинна надходити з різних джерел. Найбільш достовірною інформацією щодо конкретного ризику є статистичні дані за минулий період з відповідного об'єкта;

– своєчасність (оперативність надходження) та ін.



Рисунок 7.12 – Схема процесу управління ризиком

Інформаційне забезпечення процесу управління ризиком є важливим засобом зниження його рівня, але підвищення повноти і точності інформації також потребує витрат. Слід враховувати і фактор часу – отримання повної і достовірної інформації пов'язане зі значними його витратами, а рішення необхідно приймати в обмежені терміни. Багато видів інформації часто є коме-



рційною таємницею. Отримання такої інформації або є неможливим, або пов'язане зі значними витратами. Тому в процесі збору та обробки інформації слід прагнути до оптимального співвідношення між її повнотою й якістю, з одного боку, і вартістю отримання – з іншого. Іноді економічно вигідніше працювати з неповною інформацією, ніж збирати практично повну, але дуже дорого інформацію, що вимагає до того ж неприпустимих витрат часу. Для визначення економічно обґрунтованого обсягу інформації слід порівняти збитки, що були попереджені завдяки їй, з вартістю отримання додаткової інформації у прийнятні для життєздатності проекту терміни. Відвернений збиток визначають як різницю між очікуваними результатами господарської діяльності в умовах, коли є додаткова інформація, і без неї.

Задоволенню суперечливих вимог до інформації сприяють інформаційні технології її отримання та обробки. Для більш глибокого розуміння ризику використовують його *візуалізацію* – наочне зображення у графічному вигляді, що підкреслює суттєві сторони відповідних ризиків, важливі для аналізу та подальшого прийняття рішень.

2. *Аналіз ризику.* Інформаційною основою процесу управління ризиком є його аналіз. Основною метою аналізу є формування в ОПР цілісної картини ризиків і масштабів потенційної відповідальності. На підприємстві подібне дослідження дозволить надалі правильно організувати систему управління ризиком. В результаті аналізу ризику складається картина можливих ризикових подій, ймовірностей їх настання і наслідків, визначається можливість зниження або збільшення (у разі, коли отримані значення ризику значно нижче допустимого рівня, а його збільшення підвищить очікувану віддачу) ризику.

3. *Порівняння даних аналізу із гранично допустимими рівнями.* Після порівняння отриманих значень показників ризиків із гранично допустимими (рівнями прийнятного ризику) виробляють стратегію управління ризиком і заходи щодо його зниження.

4. *Обґрунтування програми управління ризиком.* Цей процес включає наступні етапи:

- пошук варіантів зниження ризику за рахунок відповідних превентивних заходів і покриття збитків у разі його виникнення;
- оцінка економічної ефективності витрат на управління ризиком для кожного варіанта;
- зіставлення варіантів і вибір оптимального.

При пошуку варіантів зниження ризику прогнозують зміни параметрів наявної ситуації та моделюють поведінку об'єкта, що розглядається. Варіанти зниження ризику спочатку відбирають з використанням принципу обґрунтування. При виборі методів управління ризиком слід враховувати їх різну ефективність, різний обсяг ресурсів, необхідних для їх реалізації в умовах бюджетних, тимчасових та інших обмежень.

Завдання вибору методів управління ризиком можна сформулювати як задачу оптимізації в умовах обмежень. Критерії вибору можуть бути різними. Однак під час прийняття рішення не можна все зводити до економічної відда-

чі. Важливо враховувати й інші критерії, наприклад технічні (відбивають можливості зниження ризику) або соціальні (зведення ризику до рівня, прийнятого для суспільства). Відповідні інструменти потрібно застосовувати, в першу чергу, стосовно ризиків, які найбільш сильно впливають на діяльність організації. За умов жорстких бюджетних обмежень частину ризиків, які можна оцінити як незначні, ігнорують.

Для кожного із запланованих заходів, що задовольняють принципу обґрунтування, визначають економічну ефективність. Складність оцінки ефективності полягає в тому, що протягом аналізованого періоду ризику можуть не реалізуватися, тим не менше організація несе витрати на програму управління ризиками. Тому доводиться зіставляти реальні витрати зі скороченням гіпотетичних втрат.

5. *Прийняття рішення про ступінь достатності заходів, що плануються.* Після вибору певного набору заходів приймають рішення про ступінь їх достатності. У разі достатності проєкт реалізують (прийняття ризиків, що залишились, на себе); в іншому випадку слід відмовитися від цього (уникнути ризику, ухилитися від нього).

6. *Моніторинг результатів.* Зазначений процес забезпечує зворотний зв'язок у системі управління ризиком, дозволяє вжити заходів щодо її вдосконалення. Моніторинг проводять на основі оцінки ефективності застосовуваних заходів.

### **Контрольні питання та завдання**

1. Дайте визначення терміна «ризик».
2. Назвіть основні властивості ризику.
3. Охарактеризуйте основні концепції ризику.
4. Розкрийте сутність кількісного показника ризику.
5. Яким чином визначається якісний показник ризику?
6. Надайте характеристику Концепції управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру.
7. Назвіть рівні прийнятних ризиків.
8. Назвіть критерії, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки.
9. Назвіть основні етапи процедури побудови дерева несправностей.
10. Сформулюйте методи побудови дерев несправностей.
11. Яким чином здійснюється якісний аналіз дерева несправностей?
12. Опишіть підхід до кількісної оцінки дерева несправностей.
13. Розкрийте сутність алгоритму знаходження мінімальних перерізів.
14. У чому полягає подвійність дерева несправностей?
15. Як проводиться ймовірнісна оцінка дерева несправностей? У чому полягає різниця між схемами АБО й ТА?

16. Опишіть підхід до оцінки інтенсивності відмов за деревом несправностей.
17. Розкрийте необхідність і можливість управління ризиками у соціо-техноприродних системах.
18. Опишіть структуру управління ризиками.
19. Які існують рівні управління ризиками?
20. Дайте характеристику механізмів управління ризиками.
21. Наведіть схему управління ризиками.

## ДОДАТКИ

Додаток 1

## НАКАЗ МІНІСТЕРСТВА ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ

від 06 серпня 2018 р. № 658

(Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 28 серпня 2018 р. за № 969/32421)

Таблиця Д.1.1 – Класифікаційні ознаки надзвичайних ситуацій

№ з/п	Опис ознаки (стислий опис ситуації, випадку, події, пригоди, аварії, явища)	Одиниця виміру показника ознаки	Порогове значення показника ознаки	Примітки
1	2	3	4	5
<b>Надзвичайні ситуації техногенного характеру</b>				
1	Загибель або травмування людей (персоналу) внаслідок пожеж і вибухів (крім випадків пожеж і вибухів у житлових будівлях та спорудах), руйнування підземних споруд (у тому числі обрушення покрівель гірничих виробок у шахтах)	Особа	Загинуло від 2 осіб, постраждало (травмовано) від 5 осіб	
2	Загибель або травмування людей (персоналу) внаслідок аварій, катастроф, аварійних подій (крім випадків дорожньо-транспортних пригод (ДТП)), інших небезпечних подій (у тому числі нещасних випадків)	- " -	Загинуло від 3 осіб, постраждало (травмовано) від 10 осіб	
3	Загибель, отруєння або травмування людей внаслідок вибухів та пожеж (у тому числі внаслідок отруєння чадним газом) у спорудах житлового призначення (побутові пожежі)	- " -	Загинуло від 3 осіб, постраждало від 10 осіб	
4	Загибель або травмування людей внаслідок ДТП	- " -	Загинуло від 5 осіб, постраждало (травмовано) від 15 осіб	

1	2	3	4	5
5	Аварії на транспорті з посадовою особою органу державної влади (Президент України, Голова Верховної Ради України, Прем'єр-міністр України) або народним депутатом України	Факт	1	
6	Виникнення безпосередньої загрози життю людей небезпечними (уражальними) чинниками джерела небезпечної ситуації (аварії, події), що призвело до екстреної евакуації понад 50 осіб	- " -	- " -	За винятком тимчасового відведення людей на безпечну відстань при проведенні планових робіт із вилучення вибухонебезпечних предметів
7	Викид небезпечної хімічної речовини (НХР), що має відповідний клас безпеки (відповідний ступінь токсичності), до якої відноситься небезпечний вантаж (або викид з технологічного обладнання об'єкта), що може створити або створює фактори ураження для персоналу транспортного засобу (об'єкта), населення або інших об'єктів навколишнього середовища: для НХР 1 класу безпеки для НХР 2 класу безпеки для НХР 3 класу безпеки для НХР 4 класу безпеки	Тонна - " - - " - - " -	Від 0,01 Від 0,05 Від 0,1 Від 0,5	Для випадків викиду НХР у замкнених приміщеннях порогові значення збільшуються удвічі  - " - - " - - " -
8	Викид з транспортного засобу радіоактивних речовин (РР) або пошкодження вантажу РР (упаковка, контейнер тощо), пов'язані з транспортною подією (аварією, пожежею чи іншою небезпечною подією)	Факт	1	
9	Пошкодження вантажу або розгерметизація обладнання з біологічно небезпечними речовинами (БНР)	- " -	- " -	
10	Катастрофа на залізничному транспорті (у тому числі метрополітені), що призвела до зіткнення пасажирських або вантажних поїздів з іншими	Особа	Загибло від 3 осіб, постраждало (травмовано) від 10 осіб	

1	2	3	4	5
	поїздами або рухомим складом залізничного транспорту, сходження рухомого складу в пасажирських або вантажних поїздах на перегонах і станціях, а також до загибелі та/або травмування людей			
11	Катастрофа на залізничному транспорті (у тому числі метрополітені), що призвела до зіткнення пасажирських або вантажних поїздів з іншими поїздами або рухомим складом залізничного транспорту, сходження рухомого складу в пасажирських або вантажних поїздах на перегонах і станціях, а також до пошкодження рухомого складу залізничного транспорту до ступеня виключення його з інвентарного парку	Одиниця	Від 3 (від 1 для метрополітену)	
12	Вибух (пожежа) під час руху транспортного засобу з вибухонебезпечними (легкозаймистими) речовинами, НХР або нафтопродуктами (з пошкодженням ємностей (цистерна, контейнер, упаковка тощо) небезпечного вантажу)	Факт	1	
13	Припинення руху канатної дороги під час перебування на ній людей (у холодний період року)	Година	Від 5 (2)	
14	Дуже серйозна аварія (катастрофа), що спричинила загибель судна, або затоплення судна, або вимушене залишення судна членами екіпажу та пасажирями через пошкодження корпусу і втрату остійності під час руху	Факт	1	Положення про класифікацію, порядок розслідування та обліку аварійних морських подій із суднами, затверджене наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 29 травня 2006 року № 516, зареєстроване в Міністерстві юстиції України 09 серпня 2006 року за № 959/12833. Дія цієї ознаки поширюється на

1	2	3	4	5
				пасажирські судна з кількістю пасажирів більше 10, а також на судна та катери спеціального призначення (військові, пожежні, водолазні, буксири, криголами)
15	Серйозна аварія, що спричинила простій на міліні пасажирських суден понад 12 годин	Година	від 12	- " -
16	Дуже серйозна аварія (катастрофа), що спричинила забруднення довкілля (покриття плівкою (нафтовою, масляною та іншого походження) більше 1/3 поверхні водного об'єкта за його видимої площі до 6 кв. км або більше 2 кв. км поверхні водного об'єкта за його видимої площі більше 6 кв. км) унаслідок пошкодження судна або суден під час їх експлуатації або у зв'язку з нею	Факт	1	
17	Авіаційна подія (катастрофа) з людськими жертвами, що призвела до загибелі або зникнення безвісти когось із пасажирів, членів екіпажу або третіх осіб, а також отримання ними тілесних ушкоджень, що призвели до смерті	- " -	- " -	
18	Припинення руху автомобільного транспорту на автомобільних дорогах державного значення внаслідок аварії транспорту (у разі якщо вона призвела до руйнування транспортних комунікацій та споруд)	Година	Від 12 (6)	Класифікація автомобільних доріг загального користування визначається Законом України "Про автомобільні дороги"
19	Погіршення життєзабезпечення людей внаслідок припинення руху автомобільного транспорту на обласних автомобільних дорогах місцевого значення через аварію транспорту, що призвела до руйнування транспортних комунікацій та споруд	- " -	Від 24 (6)	- " -

1	2	3	4	5
	(за неможливості об'їзду місця події іншими дорогами)			
20	Погіршення життєзабезпечення людей внаслідок припинення руху автомобільного транспорту на автомобільних дорогах державного значення або на обласних автомобільних дорогах місцевого значення через руйнування мостів, тунелів, шляхопроводів, естакад (за неможливості об'їзду місця події іншими дорогами) (в умовах дуже сильного морозу або дуже сильної спеки)	Година (Факт)	Від 24 (1)	
21	Руйнування залізничних мостів, шляхопроводів, тунелів	Факт	1	
22	Розгерметизація магістрального нафтопроводу (продуктопроводу, етиленопроводу) або його елементів з витоком нафти (нафтопродуктів, етилену) на рельєф місцевості за межі охоронної зони магістрального нафтопроводу (продуктопроводу, етиленопроводу)	- " -	- " -	
23	Припинення подачі газу внаслідок аварії на магістральному газопроводі	Година	Від 18	
24	Руйнування підприємства (об'єктів підприємства) промислового (агропромислового) виробництва внаслідок виходу з ладу газового обладнання через аварію на газопроводі	Факт	1	
25	Пожежа (вибух), для ліквідації якої (якого), крім сил та засобів пожежно-рятувальних підрозділів або інших аварійно-рятувальних служб, додатково залучено сили та засоби інших формувань цивільного захисту, а збитки (оцінені в установленому законодавством порядку), спричинені пожежею (вибухом), перевищили 0,5 тис. міні-	- " -	- " -	



1	2	3	4	5
	мальних розмірів заробітної плати			
26	Пожежа (вибух) на шахті (у підземній гірничій виробці), що поширилася у межах однієї виробки	- " -	- " -	
27	Пожежа у виробничій будівлі або споруді ГЕС, ГАЕС, ТЕС, АЕС, автономної електроенергетичної станції, що призвела до повної зупинки на строк понад 24 години всього генеруючого устаткування електростанції або до евакуації персоналу електростанції	- " -	- " -	
28	Хімічне забруднення внаслідок аварії, яке фактично або за прогнозом поширюється за межі об'єкта	- " -	- " -	
29	Наявність у ґрунтах хімічних речовин, залишкових кількостей пестицидів й агрохімікатів, важких металів тощо, що створює загрозу життю та здоров'ю людей, спричиняє шкоду довкіллю і потребує заходів зі зняття ґрунту та його вивезення	- " -	- " -	
30	Загибель деревних або чагарникових насаджень на площі більше 2 га, зрідження чи пошкодження посівів на площі більше 50 % окремого поля (що не пов'язані з гідрометеоумовами) внаслідок перевищення в ґрунті шкідливих речовин понад гранично допустимі концентрації (ГДК) (від 10 разів)	Факт	1	
31	Перевищення викидів в атмосферне повітря вмісту забруднюючих речовин понад ГДК: перевищення ГДК у 20-29 разів тривалістю понад 24 години; перевищення ГДК у 30-49 разів тривалістю понад 8 годин;	- " - - " -	- " - - " -	

1	2	3	4	5
	перевищення ГДК у 50 разів і більше	- " -	- " -	
32	Перевищення в повітрі робочого приміщення об'єкта забруднюючих речовин понад ГДК, що призвело до зупинки виробництва на строк понад 24 години	Кратність	Від 20 разів	Для шкідливих речовин з гостроспрямованою дією - від 10 разів
33	Перевищення в повітрі всередині житлового приміщення забруднюючих речовин понад ГДК, що створює загрозу життю та здоров'ю людей	- " -	- " -	- " -
34	Аварійна зупинка устаткування та апаратури для очищення газопилового потоку від забруднюючих речовин I (II) класу небезпеки розрахунковим обсягом більше 5,0 кг/год (60 кг/год) стаціонарних джерел виробництва з безперервним циклом	Година	Від 24	Клас небезпеки забруднюючих речовин визначається відповідно до наказу Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27 червня 2006 року № 309 "Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел", зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 01 серпня 2006 року за № 912/12786. Зазначені дані не поширюються на об'єкти теплоенергетики
35	Перевищення в повітрі підземної гірничої виробки шкідливих речовин понад ГДК, що призвело до зупинки виробництва понад 24 години	Кратність	Від 10 разів	
36	Покриття плівкою (нафтовою, масляною та іншого походження) більше 1/3 поверхні водного об'єкта за його видимої площі до 6 кв. км або більше 2 кв. км поверхні водного об'єкта за його	Факт	1	

1	2	3	4	5
	видимої площі більше 6 кв. км			
37	Наявність у воді (крім питної) забруднюючих та інших небезпечних речовин у концентраціях, що створюють загрозу життю та здоров'ю людей, спричиняють шкоду довкіллю і потребують заходів із екологічного оздоровлення поверхневих вод	- " -	- " -	
38	Вихід з ладу основного обладнання гірничо-металургійного заводу, у тому числі руйнування пульпопроводу	- " -	- " -	
39	Руйнування дамби хвостосховища з НХР або радіоактивними відходами	- " -	- " -	
40	Аварія на об'єкті, де використовуються ядерні матеріали, джерела іонізуючого випромінювання або зберігаються радіоактивні відходи, внаслідок чого працівники цього об'єкта отримали (чи можуть отримати) ефективну дозу опромінення понад 2 мЗв/рік (працівники категорії А - понад 50 мЗв/рік)	- " -	- " -	Державні гігієнічні нормативи "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)", введені в дію постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01 грудня 1997 року № 62 (далі - НРБУ-97)
41	Радіаційне забруднення довкілля через виникнення радіаційної аварії на об'єкті, де використовуються ядерні матеріали, джерела іонізуючого випромінювання або зберігаються радіоактивні відходи, внаслідок чого населення отримало (чи може отримати) ефективну дозу опромінення понад 1 мЗв/рік	- " -	- " -	- " -
42	Викид у навколишнє середовище радіоактивних речовин у випадку аварії на атомній станції (атомній енергетичній установці виробничого або дослідного призначення), що призвів до за-	- " -	- " -	Наказ Державного комітету ядерного регулювання України від 01 грудня 2004 року № 184 "Про затвердження

1	2	3	4	5
	бруднення промайданчика та/або санітарно-захисної зони та до підвищення потужності ефективної дози більше ніж на 1,1 мкЗв/год			Положення про порядок розслідування та обліку порушень в роботі атомних станцій", зареєстрований в Міністерстві юстиції України 17 грудня 2004 року за № 1594/10193
43	Відключення енергоблока АЕС через вихід з ладу двох та більше систем безпеки енергоблока більше ніж на 72 години або через порушення та невідновлення протягом 72 годин меж безпечної експлуатації енергоблока	- " -	- " -	- " -
44	Виявлення дії радіоактивної речовини, що перебуває у незаконному обігу, яка призвела до опромінення населення, за якого можливі перевищення квоти ліміту ефективної дози опромінення населення, або до забруднення навколишнього середовища з перевищенням допустимих рівнів надходження радіонуклідів через органи дихання, органи травлення або допустимих концентрацій у повітрі та питній воді для осіб категорії "В" (населення)	- " -	- " -	Відповідно до НРБУ-97
45	Ядерна чи радіаційна аварія, яка являє загрозу для України, про що повідомлено відповідно до міжнародної Конвенції про оперативне оповіщення про ядерну аварію або згідно з двосторонніми міжурядовими угодами	- " -	- " -	
46	Руйнування, пожежі та вибухи арсеналів баз та складів, на яких зберігаються засоби військового ураження, у тому числі застарілі	- " -	- " -	
47	Обрушення понад 10 відсотків площі будівлі або споруди (несучих конструкцій будівлі) основно-	- " -	- " -	Класи наслідків (відповідальності) будівель і споруд

1	2	3	4	5
	го виробництва підприємства, що має клас наслідків (відповідальності) СС2 або СС3			визначаються за ДБН В.1.2-14-2008 "Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ", затвердженими наказом Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 30 грудня 2008 року № 709
48	Вихід з ладу понад 10 відсотків загального обсягу основного технічного устаткування (обладнання) виробництва об'єкта (підприємства) державної власності, що має стратегічне значення для економіки і безпеки держави, внаслідок руйнування (пошкодження) його будівель та споруд	- " -	- " -	Перелік об'єктів державної власності, що мають стратегічне значення для економіки і безпеки держави, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 04 березня 2015 року № 83
49	Припинення виробничої діяльності об'єкта (підприємства) державної власності, що має стратегічне значення для економіки і безпеки держави, внаслідок руйнування його будівель та споруд виробничого призначення (у тому числі транспортних комунікацій)	Година	Від 12	- " -
50	Припинення енергопостачання автономною електроенергетичною станцією внаслідок аварії, що призвело до зупинки виробничої діяльності об'єкта (підприємства) державної власності, що має стратегічне значення для економіки і безпеки держави	Факт	1	- " -
51	Припинення енергопостачання ГЕС потужністю до 50 МВт внаслідок аварії з втратою штатних	Година	Від 24	

1	2	3	4	5
	джерел живлення власних потреб			
52	Припинення енергопостачання ГЕС потужністю понад 200 МВт внаслідок аварії з втратою штатних джерел живлення власних потреб	- " -	Від 6	
53	Зупинка енергогенеруючих потужностей ТЕС понад 500 МВт внаслідок руйнування виробничих будівель та споруд через аварію на основному устаткуванні (котли, турбіни, генератори) або внаслідок виходу з ладу джерел життєзабезпечення енерговиробництва (резервуарів води, мазуту, газопроводів, підживлювальних трубопроводів)	- " -	Від 6	
54	Зупинка електроенергетичної станції в опалювальний період внаслідок аварії на основному устаткуванні: потужністю від 4 до 50 МВт потужністю від 51 до 115 МВт потужністю від 116 до 500 МВт	- " - - " - - " -	Від 8 Від 4 Від 2	
55	Припинення енергопостачання з аварійних причин об'єктів підприємств, установ та організацій, повне відключення яких від електричних мереж може призвести до негативних екологічних та техногенних наслідків, що створюють загрозу життю та здоров'ю людей	Факт	1	
56	Припинення енергопостачання основних об'єктів і спеціальних споруд військового призначення, що може призвести до негативних екологічних та техногенних наслідків, які створюють загрозу життю та здоров'ю людей	Година	Від 12	
57	Робота об'єднаної енергосистеми України або її частини з частотою нижче 49,2 Гц	- " -	Від 0,5	

1	2	3	4	5
58	Робота об'єднаної енергосистеми України або її частини з частотою більше 50,3 Гц	- " -	Від 1	
59	Прорив греблі ГЕС на водосховищі річок Дніпро або Дністер	Факт	1	
60	Утворення проривного паводка	- " -	- " -	Проривний паводок - хвиля прориву води внаслідок гідродинамічної аварії на гідротехнічних спорудах з рівнем її гребеня, що дорівнює або перевищує рівень розрахункового паводка (повені) забезпеченістю 15-10 %
61	Руйнування елементів обладнання і конструкції бурової установки (свердловини), що призвело до виникнення вибухів, пожеж, грифонів на ній	- " -	- " -	
62	Аварія в системах нафтогазового промислового комплексу з виникненням газонафтоводо виявлень, відкритих нафтових і газових фонтанів, неконтрольованих викидів нафти, газу (води зі свердловини), внаслідок чого виникла загроза життю людей (персоналу об'єктів) або загроза виникнення пожеж, вибухів чи руйнувань об'єктів	- " -	- " -	
63	Аварія на газопроводі та вихід з ладу газового обладнання, що створюють загрозу вибуху газу в багатоквартирних житлових будинках, або витік газу з виникненням загрози для життя людей, які перебувають за межами охоронної зони газопроводу	- " -	- " -	
64	Перевищення мікробіологічних і токсичних показників питної води у системі централізованого	Доба	Від 5	Мікробіологічні та токсичні показники питної води, вста-

1	2	3	4	5
	водопостачання населеного пункту протягом тривалого періоду			новлені Державними санітарними нормами та правилами "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" (ДСанПіН 2.2.4-171-10), затвердженими наказом Міністерства охорони здоров'я України від 12 травня 2010 року № 400, зареєстрованими в Міністерстві юстиції України 01 липня 2010 року за № 452/17747
65	Припинення використання джерел нецентралізованого питного водопостачання населення внаслідок перевищення ГДК шкідливих (забруднюючих) речовин згідно з чинними нормативними документами в підземних водах у водоносному горизонті	Факт	1	
66	Руйнування будівлі або споруди цивільного призначення, що має клас наслідків (відповідальності) СС2 або СС3, у тому числі житлового будинку, унаслідок аварії на газопроводі та виходу з ладу газового обладнання	- " -	- " -	Класи наслідків (відповідальності) будівель і споруд визначаються за ДБН В.1.2-14-2008
67	Руйнування окремої будівлі або споруди цивільного призначення (у тому числі житлового), що має клас наслідків (відповідальності) СС3 (СС2)	Відсоток	Від 25 % (від 50 %) будівлі або споруди	- " -
68	Зниження рівня води джерела централізованого водопостачання нижче проектних позначок водозабірної споруди	Факт	1	Для міст з населенням більше 100 тис. осіб
69	Скидання неочищених чи недостатньо очищених стічних вод на території населеного пункту або у	Куб. м	Понад 500	



1	2	3	4	5
	водні об'єкти в обсязі понад 100 куб. м за годину, загальний обсяг скиду			
70	Припинення електропостачання населених пунктів Автономної Республіки Крим, області на добу і більше через масове пошкодження електричних мереж напругою 6 кВ і вище	Відсоток населених пунктів	Від 10	
71	Відключення або вихід з ладу на 12 годин і більше потужності підстанцій напругою 110 кВ і вище, що забезпечують енергопостачання міст Київ, Севастополь, Сімферополь та обласних центрів	Відсоток потужності від загальної потужності підстанцій напругою 110 кВ і вище	Від 25	
72	Припинення експлуатації об'єктів водопостачання та водовідведення в містах Київ, Севастополь, Сімферополь та обласних центрах через відключення їх від джерел енергоживлення внаслідок аварії у системі енергозабезпечення (пошкодження електричних мереж)	Година	Від 8	
73	Припинення теплопостачання споживачів за температури зовнішнього повітря нижче 0°C в опалювальний період року через пошкодження магістральних теплових мереж або обладнання комунальних та відомчих котелень	- " -	Від 24	
74	Припинення теплопостачання споживачів за температури зовнішнього повітря від 0 °С до +8 °С в опалювальний період року через пошкодження магістральних теплових мереж або обладнання комунальних та відомчих котелень	- " -	Від 48	
75	Припинення водопостачання більше 30 відсотків розрахункового обсягу водопостачання населеного пункту через аварії на об'єктах водопоста-	- " -	Від 18	

1	2	3	4	5
	чання або пошкодження мереж водопостачання			
76	Припинення подачі газу внаслідок аварії на комунальному газопроводі в район (населений пункт), що обслуговується (з кількістю абонентів понад 500)	- " -	Від 24	
77	Аварія системи централізованого водо-, тепло-, енерго-, газопостачання або водовідведення населеного пункту в умовах дуже сильного морозу або дуже сильної спеки	Факт	1	Для міст з населенням більше 50 тис. осіб
78	Технічна неможливість забезпечення зв'язку (повна неможливість забезпечення усіх видів зв'язку) із сільським чи міським районом через аварію систем зв'язку та телекомунікації	Година	Від 24	
<b>Надзвичайні ситуації природного характеру</b>				
1	Загибель або травмування (захворювання, отруєння) людей внаслідок небезпечних природних явищ або подій медико-біологічного характеру	Особа	Загинуло від 3 осіб, госпіталізовано від 10 осіб	
2	Виникнення безпосередньої загрози життю людей небезпечними (уражальними) чинниками небезпечного природного явища, що призвело до екстреної евакуації понад 50 осіб	Факт	1	
3	Землетруси з перевищенням фонові сейсмічності на 1 бал	- " -	- " -	Показники фонові сейсмічності територій визначаються відповідно до ДБН В.1.1:12-2006 "Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво у сейсмічних районах України", затверджених наказом Міністерст-

1	2	3	4	5
				ва будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України від 23 серпня 2006 року № 282 (додаток Б - карта ЗСР-2004-А)
4	Землетруси з інтенсивністю понад 5 балів за шкалою MSK-64 у місцях розміщення (знаходження) об'єктів підвищеної небезпеки	- " -	- " -	Шкала сейсмічної інтенсивності визначається відповідно до ДСТУ Б В.1.1-28:2010 "Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності", затвердженого наказом Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 23 грудня 2010 року № 539
5	Руйнування окремої будівлі або споруди цивільного призначення (у тому числі житлового), що має клас наслідків (відповідальності) СС3 (СС2), внаслідок впливу небезпечного природного явища (зсув, карст, підтоплення, абразія берегів, сильний вітер, сильна злива, крупний град, сильний снігопад, повінь, паводок, снігова лавина, сель тощо)	Відсоток	Від 25 % (від 50 %) будівлі або споруди	Класи наслідків (відповідальності) будівель і споруд визначаються за ДБН В.1.2-14-2008
6	Масові руйнування або пошкодження будівель та споруд цивільного призначення (у тому числі житлового), що мають клас наслідків (відповідальності) СС1, внаслідок впливу небезпечного природного явища (землетрус, зсув, сильний вітер, крупний град, сильний снігопад, сильна	- " -	Від 50 % будівель та споруд у зоні руйнувань	- " -

1	2	3	4	5
	ожеледь, повінь, паводок, снігова лавина, сель тощо)			
7	Пошкодження та/або руйнування окремих об'єктів електричних мереж напругою вище 6 кВ внаслідок небезпечних природних гідрометеорологічних явищ (сильний вітер, сильна ожеледь, сильні складні відкладення, сильне налипання мокрого снігу, повінь, паводок, снігова лавина, сель тощо)	Одиниць об'єктів електричних мереж постачальника на території його ліцензійної діяльності	Від 25 одиниць у зоні руйнувань та пошкоджень	
8	Масове пошкодження та загибель посівів сільськогосподарських культур, незібраного врожаю (травостою) внаслідок небезпечних природних гідрометеорологічних явищ (сильна злива, дуже сильний або тривалий дощ, крупний град, сильний снігопад, сильний мороз, заморозки, сильна спека, сильна пилова буря, суховій, повінь, паводок, сель тощо) не менше ніж 1000 га	Відсоток	Від 60 % площ посіву сільськогосподарських культур об'єднаної територіальної громади, від 30 % - району Автономної Республіки Крим, області (від 10 % для Автономної Республіки Крим або області)	
9	Масове пошкодження та загибель плодових культур або винограду (незібраного врожаю) внаслідок небезпечних природних гідрометеорологічних явищ (сильний вітер, сильна злива, крупний град, сильний снігопад, сильний мороз, заморозки, сильна спека, суховій, повінь, паводок, сель тощо)	- " -	Від 10 % площі рослин (від 30 % незібраного врожаю) району Автономної Республіки Крим, області	
10	Погіршення життєзабезпечення людей внаслідок припинення руху на багатокільній або однокільній залізничній ділянці через вплив небезпечного природного явища (зсув, карст, повінь, паводок, снігова лавина, сель тощо), що призвело до руйнування транспортних комунікацій (в умовах дуже сильного морозу або дуже сильної спеки)	Година (Факт)	Від 5 (1)	

1	2	3	4	5
11	Погіршення життєзабезпечення людей внаслідок припинення руху автомобільного транспорту на автомобільних дорогах державного значення або обласних автомобільних дорогах місцевого значення через вплив небезпечного природного явища (зсуви, карст, повінь, паводок, снігова лавина, сель тощо), що призвело до руйнування транспортних комунікацій та споруд (за неможливості об'їзду місця події іншими дорогами)	Факт	1	Класифікація автомобільних доріг загального користування визначається Законом України "Про автомобільні дороги"
12	Погіршення життєзабезпечення людей внаслідок припинення руху автомобільного транспорту на автомобільних дорогах державного значення через вплив небезпечного природного явища (сильний снігопад, сильна ожеледь, сильна хуртовина, снігові замети тощо)	Година	Від 12	- " -
13	Погіршення життєзабезпечення людей внаслідок припинення руху автомобільного транспорту на обласних автомобільних дорогах місцевого значення через вплив небезпечного природного явища (сильний снігопад, сильна ожеледь, сильна хуртовина, снігові замети тощо) (за неможливості об'їзду місця події іншими дорогами)	- " -	Від 36 (12)	- " -
14	Аварія системи централізованого водо-, тепло-, енерго-, газопостачання або водовідведення населеного пункту через дуже сильний мороз або дуже сильну спеку	Факт	1	Для міст з населенням більше 50 тис. осіб
15	Затоплення, руйнування будівель та споруд у прибережній зоні та на узбережжі або виникнення аварійних морських подій (у тому числі наявність суден, що втратили хід та потребують льодового проведення) через вплив небезпечних гідрометеорологічних морських явищ (значне по-	- " -	- " -	Положення про класифікацію, порядок розслідування та обліку аварійних морських подій із суднами, затверджене наказом Міністерства транспорту та зв'язку України

1	2	3	4	5
	силення вітру на акваторії Чорного і Азовського морів, сильне хвилювання на морі та на водосховищах, високі або низькі рівні моря, поява в прибережній зоні важкопрохідного льоду або льодового покриву в аномально ранні строки, інтенсивне (0,7 см/годину і більше) обледеніння суден, інтенсивний дрейф та напір льоду на берег)			від 29 травня 2006 року № 516, зареєстроване в Міністерстві юстиції України 09 серпня 2006 року за № 959/12833
16	Утворення мілин та обмілин акваторії Азовського моря та Керченської протоки, що створюють загрозу судноплавству	- " -	- " -	
17	Затоплення об'єктів підвищеної небезпеки	- " -	- " -	Об'єкти підвищеної небезпеки визначаються відповідно до Закону України "Про об'єкти підвищеної небезпеки"
18	Затоплення території	Га	Від 5 тис.	
19	Порушення нормальних умов життєдіяльності понад 50 осіб внаслідок затоплення житлових будівель населеного пункту	Факт	1	
20	Порушення нормальних умов життєдіяльності понад 100 осіб внаслідок підвищення рівня ґрунтових вод на забудованих територіях до глибини вище проектних норм осушення	- " -	- " -	Згідно з ДБН В.1.1-25-2009 "Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Інженерний захист територій та споруд від підтоплення та затоплення", затвердженими наказом Міністерства регіонального розвитку та будівництва України від 02 грудня 2009 року № 550

1	2	3	4	5
21	Лісова пожежа верхова (низова) на площі:  для заповідних територій та об'єктів особливого природоохоронного значення для території зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення	Га	Від 25 (від 50) Від 5 (від 10) Від 10 (від 20)	
22	Вилучення ділянок лісу із лісогосподарського обігу внаслідок пожежі	- " -	Від 10	
23	Торф'яна пожежа на значних площах для заповідних територій та об'єктів особливого природоохоронного значення	- " -	Від 50 Від 5	
24	Лісова (торф'яна) пожежа, що потребує залучення сил і засобів пожежогасіння двох держлісгоспів, інших розташованих у межах району підприємств згідно з мобілізаційно-оперативним планом, а також сил і засобів пожежно-рятувальних підрозділів Оперативно-рятувальної служби (від двох підрозділів гарнізону) та інших формувань цивільного захисту	Факт	1	
25	Пожежа степових масивів (посівів сільськогосподарських культур), очерету на площі для заповідних територій та об'єктів особливого природоохоронного значення	Га	Від 50 (від 25) Від 10	
26	Вилучення земельних ділянок із сільськогосподарського обігу внаслідок пожежі	- " -	Від 25	
27	Захворювання людей на особливо небезпечні інфекційні хвороби: чума, холера, віспа (натуральна), жовта гарячка, гарячка Ласса, хвороба, спричинена вірусом Ебола, хвороба, спричинена вірусом Марбург, Кримська геморагічна гарячка, спричинена вірусом Конго, гарячка Денге, гемо-	Особа	Від 1	Згідно з Переліком нозологічних форм інфекційних хвороб, що мають міжнародне значення, наведеним у додатку 1 до Правил санітарної охорони території України,

1	2	3	4	5
	рагічна гарячка Мачупо (болівійська), геморагічна гарячка Хунін (аргентинська), гарячка Західного Нілу, тяжкий гострий респіраторний синдром (ТГРС) - SARS, поліомієліт, спричинений диким поліовірусом, високопатогенний пташиний грип, грип, спричинений новим субтипом, малярія, менінгококова хвороба			затверджених постановою Кабінету Міністрів України від 22 серпня 2011 року № 893
28	Захворювання людей на особливо небезпечні інфекційні хвороби: сибірка, сказ, туляремія, бруцельоз, гарячка Ку, лістеріоз, трихінельоз, кліщовий енцефаліт, лейшманіоз	- " -	- " -	
29	Захворювання людей на особливо небезпечні інфекційні хвороби: лептоспіроз, орнітоз	- " -	Від 5 протягом 3 днів	
30	Захворювання людей на небезпечні інфекційні хвороби: черевний тиф, дифтерія, кір, краснуха, епідемічний паротит, генералізовані форми менінгококової інфекції	- " -	Від 3 протягом 3 днів (для дифтерії, кору, краснухи, епідемічного паротиту від 3 осіб, які епідеміологічно пов'язані між собою спільним джерелом чи фактором передачі)	
31	Захворювання людей на небезпечні інфекційні хвороби: шигельоз (дизентерія) та інші гострі кишкові інфекційні захворювання встановленої та невстановленої етіології, сальмонельоз, вірусний гепатит А	- " -	Від 5 - в організованих колективах (від 10 - серед населення) протягом 3 днів	
32	Перевищення порогового рівня захворюваності людей на грип, гострі респіраторні вірусні захворювання удвічі і більше разів протягом періоду понад 2 тижні у двох та більше адміністративних районах області (Автономна Республіка Крим, міста Київ та Севастополь), містах або в	Факт	1	



1	2	3	4	5
	цілому по країні			
33	Інфекційні захворювання людей невиявленої етіології (гарячковий стан більше 5 днів та/або пронос більше 5 раз на добу протягом 3 днів)	Особа	Від 10	
34	Отруєння людей хімічними або токсичними речовинами військового походження	Факт	1	
35	Випадок отруєння від 10 людей НХР, що використовуються на виробництві, або іншими небезпечними речовинами	Особа	- " -	Від 10 - окреме, від 26 - групове, від 101 - масове
36	Одночасне отруєння людей з одного колективу внаслідок споживання продуктів харчування або води: ботулізм токсиканти одного виду дикорослі гриби та рослини або комбінація токсикантів двох і більше видів	- " - - " - - " -	Від 1 Від 10 Від 5	
37	Випадок отруєння від 5 людей невстановленою речовиною (отрутою)	Факт	1	Від 5 - окреме, від 11 - групове, від 51 - масове
38	Випадок масової загибелі водних біоресурсів (риби, моллюсків, водної рослинності та інших водних організмів) на площі водної поверхні понад 1 кв. км	- " -	- " -	
39	Захворювання сільськогосподарських та/або диких тварин на екзотичні та особливо небезпечні інфекційні (карантинні) хвороби: африканська чума свиней, хвороба Ньюкасла, сибірка, ящур тощо	- " -	- " -	Згідно з Переліком особливо небезпечних (карантинних) хвороб тварин, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 08 серпня 2007 року № 1006
40	Захворювання сільськогосподарських тварин невизначеної етіології	- " -	- " -	

1	2	3	4	5
41	Масове отруєння сільськогосподарських тварин	Умовних голів	Від 300	
42	Загибель сільськогосподарських тварин унаслідок масового отруєння	- " -	Від 100	
43	Загибель від 30 % чисельності диких тварин одного виду, які населяють територію району Автономної Республіки Крим або області, через інфекційне захворювання	Факт	1	
44	Загибель від 40 % чисельності диких тварин одного виду, які населяють територію адміністративного району, унаслідок стихійного лиха (глибокий сніг, сильний мороз, сильна ожеледь, повінь тощо)	- " -	- " -	
45	Інфекційне захворювання диких тварин, що призвело до введення карантину на території двох лісництв адміністративного району або окремого населеного пункту	- " -	- " -	
46	Поширення небезпечної хвороби рослин на великій площі в умовах масового інфекційного захворювання з ураженням понад 25 відсотків загальної кількості сільськогосподарських рослин у зоні поширення (уражено більше 50 відсотків поверхні рослин)	Га	Від 1000	Віднесення хвороб до того чи іншого ступеня небезпечності визначається Міністерством аграрної політики та продовольства України
47	Поширення особливо небезпечної хвороби рослин на великій площі в умовах масового інфекційного захворювання з ураженням понад 10 відсотків загальної кількості сільськогосподарських рослин у зоні поширення (уражено більше 50 відсотків поверхні рослин)	- " -	Від 500	- " -
48	Розповсюдження шкідливих комах, гризунів та інших видів небезпечних шкідливих об'єктів на великій площі, що призвело до пошкодження	- " -	Від 1000	Віднесення шкідників до того чи іншого ступеня небезпечності визначається Мініс-

1	2	3	4	5
	понад 25 відсотків загальної кількості рослин у зоні розповсюдження (пошкодження понад 50 відсотків поверхні рослини)			терством аграрної політики та продовольства України
49	Розповсюдження шкідливих комах, гризунів та інших видів особливо небезпечних шкідливих об'єктів на великій площі, що призвело до пошкодження понад 25 відсотків загальної кількості рослин у зоні розповсюдження (пошкодження понад 50 відсотків поверхні рослини)	- " -	Від 500	- " -
50	Масове пошкодження та загибель (всихання) лісових насаджень внаслідок ушкодження їх шкідливими комахами та хворобами	Га	Від 500	
51	Масове пошкодження та загибель лісових масивів внаслідок небезпечних природних гідрометорологічних явищ (сильна злива, дуже сильний або тривалий дощ, крупний град, сильний снігопад, сильний мороз, заморозки, сильна спека, сильна пилова буря, суховій, повінь, паводок, сель тощо)	- " -	- " -	
<b>Надзвичайні ситуації соціального характеру</b>				
1	Загибель або травмування людей внаслідок небезпечних подій (у тому числі внаслідок нещасних випадків на воді)	Особа	Загинуло від 3 осіб, постраждало від 10 осіб	
2	Збройний напад, захоплення та утримування будівель органів державної влади	Факт	1	
3	Збройний напад на дипломатичне чи консульське представництво	- " -	- " -	
4	Збройний напад, захоплення та утримування будівель правоохоронних органів	- " -	- " -	
5	Збройний напад, захоплення та утримування будівель телерадіоцентрів та вузлів зв'язку	- " -	- " -	

1	2	3	4	5
6	Збройний напад, скоєний на об'єкти військового призначення	- " -	- " -	
7	Збройний напад, захоплення та утримування будівель державних закладів	- " -	- " -	
8	Збройний напад або несанкціоновані дії фізичних осіб стосовно ядерних об'єктів	- " -	- " -	
9	Замах на життя посадової особи органу державної влади (Президент України, Голова Верховної Ради України, Прем'єр-міністр України) або народного депутата України	- " -	- " -	
10	Напад, замах на життя членів екіпажу повітряного або морського (річкового) судна, викрадення (спроба викрадення), знищення (спроба знищення) такого судна, захоплення заручників на борту судна	- " -	- " -	
11	Виявлення вибухового пристрою (іншого смертоносного пристрою масового ураження, за винятком застарілих боєприпасів) у громадському місці, установі, організації, на підприємстві, у житловому секторі, на транспорті, що призвело до евакуації населення	- " -	- " -	
12	Вибух (здіяння) вибухового пристрою (іншого смертоносного пристрою масового ураження, за винятком застарілих боєприпасів) у громадському місці, установі, організації, на підприємстві, у житловому секторі, на транспорті, що призвело до загибелі або травмування людей	- " -	- " -	
13	Зникнення або викрадення вогнепальної зброї першої і другої категорій ураження з боєприпасами	- " -	- " -	У випадку зникнення або викрадення з об'єктів зберігання, використання, перероблення та під час транспорту-

1	2	3	4	5
				вання
14	Зникнення або викрадення вогнепальної зброї третьої категорії ураження без боєприпасів або з боєприпасами	- " -	- " -	- " -
15	Зникнення або викрадення гранат, артилерійських боєприпасів, мін, бомб або підричних зарядів	- " -	- " -	- " -
16	Зникнення або викрадення бронетехніки	- " -	- " -	- " -
17	Зникнення або викрадення артилерійського озброєння, готового до застосування	- " -	- " -	- " -
18	Зникнення або викрадення бризантних вибухових матеріалів або ініціювальних засобів	- " -	- " -	- " -
19	Зникнення або викрадення плутонію неопроміненого, урану-233 неопроміненого, урану зі збагаченням за ураном-235 - 20 % та більше	Кг	Від 0,015	- " -
20	Зникнення або викрадення урану зі збагаченням за ураном-235 від 10 % до 20 % (із збагаченням за ураном-235 вище природного, але менше 10 %)	- " -	Від 1 (від 10)	- " -
21	Зникнення або викрадення НХР, що можуть створити або створюють фактори ураження для персоналу об'єкта, населення або інших об'єктів навколишнього середовища:  для НХР 1 класу небезпеки для НХР 2 класу небезпеки для НХР 3 класу небезпеки для НХР 4 класу небезпеки	Тонна - " - - " - - " -	Від 0,01 Від 0,05 Від 0,2 Від 2	У випадку зникнення або викрадення з об'єктів зберігання, використання, перероблення та під час транспортування
22	Зникнення або викрадення з об'єктів виробництва, зберігання, переробки, реалізації та під час транспортування наркотичних засобів, психот-	Факт	1	Особливо великі розміри визначаються згідно з наказом Міністерства охорони здо-

1	2	3	4	5
	ропних речовин, прекурсорів в особливо великих розмірах			ров'я України від 01 серпня 2000 року № 188 "Про затвердження таблиць невеликих, великих та особливо великих розмірів наркотичних засобів, психотропних речовин і прекурсорів, які знаходяться у незаконному обігу", зареєстрованим у Міністерстві юстиції України 16 серпня 2000 року за № 512/4733
23	Виявлення скупчень (складів) застарілих боеприпасів, знешкодження яких обумовило залучення спеціальних підрозділів на тривалий час	Доба	Понад 3	
24	Перебування від 10 осіб на крижині, що дрейфувала у відкритому морі, водосховищі або річці, що обумовило залучення сил та засобів формувань цивільного захисту	Факт	1	
25	Нещасний випадок з групою людей (від 3 осіб) у лісових, гірських масивах, печерах та інших рекреаційних зонах, пов'язаний зі зникненням людей (у тому числі на воді), коли до пошуку залучаються значні сили (від 50 осіб) на тривалий час (понад 2 доби)	- " -	- " -	

# КЛАСИФІКАТОР НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ДК 019:2010

(Прийнято та надано чинності

Наказом Держспоживстандарту України від 11 жовтня 2010 р. № 457)

Чинний від 01.01.2011

## ВСТУП

Національний класифікатор ДК 019:2010 "Класифікатор надзвичайних ситуацій" (КНС) - один зі складників комплексу національних класифікаторів.

У класифікаторі зазначено впорядковані назви сучасних надзвичайних ситуацій (НС), які можуть виникнути в Україні, та їхні коди.

У класифікаторі наведено перелік НС, визначених у відповідних нормативно-правових актах і згрупованих за ознаками належності до відповідних типів НС (виявлені та можливі), які можуть виникнути на окремій території України чи об'єкті в різних галузях національного господарства країни.

Додаток А (Абетковий покажчик НС) і додаток Б (Бібліографія) - довідкові.

Ведення ДК 019:2010 здійснює Всеукраїнський науково-дослідний інститут цивільного захисту населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру МНС України.

## 1 СФЕРА ЗАСТОСУВАННЯ

Національний класифікатор "Класифікатор надзвичайних ситуацій" (КНС) застосовують для збирання адміністративних даних та організації взаємодії органів центральної виконавчої влади, відомств, організацій, підприємств під час вирішування питань, пов'язаних із надзвичайними ситуаціями (НС).

Класифікатор можна використовувати для машинного оброблення статистичної інформації в автоматизованих системах і забезпечення інформаційної сумісності задач органів різних рівнів керування.

## 2 НОРМАТИВНІ ПОСИЛАННЯ

У цьому класифікаторі є посилання на такі нормативні документи:

ДСТУ 1.10:2005 Національна стандартизація. Правила розроблення, побудови, викладання, оформлення, ведення національних класифікаторів

ДСТУ 2272:2006 Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять

ДСТУ 3041-95 Система стандартів у галузі охорони навколишнього середовища та раціонального використання ресурсів. Гідросфера. Використання і охорона води. Терміни та визначення

ДСТУ 3513-97 Метеорологія. Терміни та визначення основних понять

ДСТУ 3517-97 Гідрологія суші. Терміни та визначення основних понять

ДСТУ 3891-99 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Терміни та визначення основних понять

ДСТУ 3994-2000 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Надзвичайні ситуації природні. Чинники фізичного походження. Терміни та визначення

ДСТУ 4933:2008 Безпека у надзвичайних ситуаціях. Техногенні надзвичайні ситуації. Терміни та визначення основних понять.

### 3 ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ПОНЯТЬ

У цьому класифікаторі використано терміни, визначені в ДСТУ 1.10, ДСТУ 2272, ДСТУ 3041, ДСТУ 3513, ДСТУ 3517, ДСТУ 3891, ДСТУ 3994, ДСТУ 4933, а також наведені нижче терміни та визначення позначених ними понять.

#### 3.1 надзвичайна ситуація; НС

Порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, спричинене аварією, катастрофою, стихійним лихом чи іншою небезпечною подією, зокрема епідемією, епізоотією, епіфітотією, пожежею, що призвело (може призвести) до виникнення великої кількості постраждалих, загрози життю та здоров'ю людей, їх загибелі, значних матеріальних утрат, а також до неможливості проживання населення на території чи об'єкті, ведення там господарської діяльності.

*Примітка 1.* Епізоотія - широке вибухоподібне розповсюдження заразної хвороби тварин, що значно перевищує звичайний рівень захворюваності на цю хворобу на даній території. У разі епізоотії можлива реквізиція майна в населення, задля суспільної потреби.

*Примітка 2.* Епіфітотія - вибухоподібне розповсюдження заразної хвороби рослин, що значно перевищує звичайний рівень захворюваності на цю хворобу на даній території. Аналог епізоотії у тварин та епідемії у людей

#### 3.2 класифікація надзвичайних ситуацій

Визначений на державному рівні порядок поділу надзвичайних ситуацій на класи і підкласи залежно від їхнього характеру

#### 3.3 аварія

Небезпечна подія техногенного характеру, що спричинила ураження, травмування та/чи загибель людей або створює на об'єкті чи окремій території загрозу життю та здоров'ю людей і призводить до руйнування будівель, споруд, устаткування і транспортних засобів, порушення виробничого або транспортного процесу чи завдає шкоди довкіллю.

### 4 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ КЛАСИФІКАЦІЇ

Об'єкти класифікації в КНС - надзвичайні ситуації (НС).

Класифікації підлягають НС (виявлені й можливі), а також ті, що можуть виникнути на об'єкті в різних галузях національного господарства чи на окремій території України.



Класифікаційна ознака НС – технічна чи інша характеристика події, що її визначають установленим порядком і яка дає змогу віднести подію до надзвичайної ситуації.

*Надзвичайні ситуації* класифікують за характером походження, ступенем поширення, розміром людських втрат і матеріальних збитків.

Залежно від характеру походження подій, що можуть зумовити виникнення надзвичайних ситуацій на території України, визначають такі *види надзвичайних ситуацій*:

- техногенного характеру;
- природного характеру;
- соціального характеру;
- воєнного характеру.

*Надзвичайна ситуація техногенного характеру* – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті унаслідок транспортної аварії (катастрофи), пожежі, вибуху, аварії з викиданням (загрозою викидання) небезпечних хімічних, радіоактивних і біологічно небезпечних речовин, раптового руйнування споруд; аварії в електроенергетичних системах, системах життєзабезпечення, системах телекомунікацій, на очисних спорудах, у системах нафтогазового промислового комплексу, гідродинамічних аварій тощо.

*Надзвичайна ситуація природного характеру* – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, пов'язане з небезпечним геофізичним, геологічним, метеорологічним або гідрологічним явищем, деградацією ґрунтів чи надр, пожежею у природних екологічних системах, зміною стану повітряного басейну, інфекційною захворюваністю та отруєнням людей, інфекційним захворюванням свійських тварин, масовою загибеллю диких тварин, ураженням сільськогосподарських рослин хворобами та шкідниками тощо.

*Надзвичайна ситуація соціального характеру* – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, спричинене протиправними діями терористичного і антиконституційного спрямування, або пов'язане із зникненням (викраденням) зброї та небезпечних речовин, нещасними випадками з людьми тощо.

*Надзвичайна ситуація воєнного характеру* – порушення нормальних умов життя та діяльності людей на окремій території чи об'єкті на ній або на водному об'єкті, спричинене застосуванням звичайної зброї або зброї масового ураження, під час якого виникають вторинні чинники ураження населення, що її визначають в окремих нормативних документах. У цьому класифікаторі НС воєнного характеру не подано в подробицях, а лише зазначено на найвищому рівні деталізації з кодом 40000.

Залежно від обсягів заподіяних надзвичайною ситуацією наслідків, кількості постраждалих і загиблих, обсягів технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для ліквідації її наслідків, визначають такі *рівні надзвичайних ситуацій*:

- державний;
- регіональний;
- місцевий;
- об'єктовий.

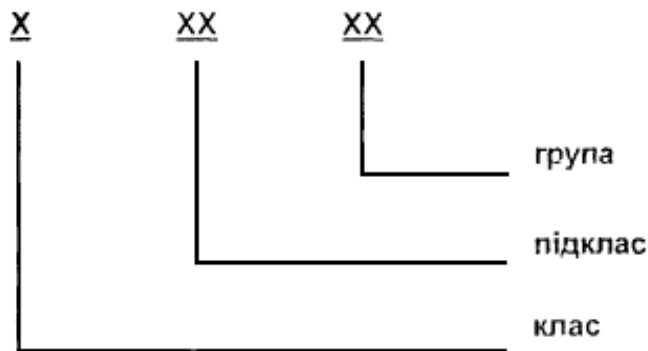
За структурою класифікатор складається з трьох рівнів класифікації: клас, підклас, група.

Метод класифікації - ієрархічний, послідовний, п'ятизначний.

Позиція класифікатора має блок ідентифікації та блок назви класифікаційного угруповання.

Кодування НС на нижчому класифікаційному рівні (група) виконано за фасетною схемою, у якій фасети також структуровані. Це забезпечує усталеність структури класифікатора в процесі його ведення, оскільки оперативні зміни об'єктів класифікації відбуваються на цьому рівні.

Структура коду класифікатора має 5 розрядів і відповідає такій схемі:



*Приклад*

<b>10000</b>	<b>НС ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ</b>
<b>10100</b>	<b>НС УНАСЛІДОК АВАРІЙ ЧИ КАТАСТРОФ НА ТРАНСПОРТІ (за винятком пожеж і вибухів)</b>
<b>10110</b>	<b>НС унаслідок аварії на транспорті з викиданням (загрозою викидання) небезпечних і шкідливих (забруднювальних) речовин</b>
10111	НС унаслідок аварії на транспорті з викиданням (загрозою викидання) БНР

#### 5 ПОЗНАКИ ТА СКОРОЧЕННЯ

У таблиці Д.1.2 "Класифікація надзвичайних ситуацій" використано такі позначки та скорочення:

- БНР – біологічно небезпечна речовина
- ГДК – гранично-допустима концентрація
- НХР – небезпечна хімічна речовина
- РР – радіоактивна речовина.

Таблиця Д.1.2 – Класифікаційні ознаки надзвичайних ситуацій

<b>КОД</b>	<b>НАЗВА</b>
<b>10000</b>	<b>НС ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ</b>
<b>10100</b>	<b>НС УНАСЛІДОК АВАРІЙ ЧИ КАТАСТРОФ НА ТРАНСПОРТІ (за винятком пожеж і вибухів)</b>
<b>10110</b>	<b>НС унаслідок аварій на транспорті з викиданням (загрозою викидання) небезпечних і шкідливих (забруднювальних) речовин</b>
10111	НС унаслідок аварії на транспорті з викиданням (загрозою викидання) БНР
10112	НС унаслідок аварії на транспорті з викиданням (загрозою викидання) РР
10113	НС унаслідок аварії на транспорті з викиданням (загрозою викидання) НХР
10114	НС унаслідок аварії на транспорті з загрозою розливання паливно-мастильних матеріалів
<b>10120</b>	<b>НС унаслідок аварії на транспорті, у яку потрапив державний чи громадський діяч</b>
<b>10130</b>	<b>НС унаслідок аварії на залізничному транспорті з тяжкими наслідками (катастрофи)</b>
10131	НС унаслідок аварії в метрополітені
<b>10140</b>	<b>НС унаслідок аварій на водному транспорті</b>
10141	НС унаслідок аварії на вантажному судні
10142	НС унаслідок аварії нафтоналивного судна з загрозою розливання паливно-мастильних матеріалів
10143	НС унаслідок аварії на судні для перевезення хімічних речовин
10144	НС унаслідок аварії пасажирського судна
10145	НС унаслідок аварії на судні рибної промисловості
<b>10150</b>	<b>НС унаслідок авіаційних аварій і катастроф</b>
10151	НС унаслідок авіаційної аварії чи катастрофи в аеропорту або у населеному пункті
10152	НС унаслідок авіаційної аварії чи катастрофи поза аеропортом або населеним пунктом
<b>10160</b>	<b>НС унаслідок аварій автомобільного транспорту</b>
0161	НС унаслідок аварії автомобільного транспорту на шляхах загального користування
10162	НС унаслідок аварії автомобільного транспорту на мосту, у тунелі, на залізничному переїзді
<b>10170</b>	<b>НС унаслідок аварій на трубопроводах</b>
10171	НС унаслідок аварії на магістральному газопроводі
10172	НС унаслідок аварії на нафтопроводі або продуктопроводі
<b>10180</b>	<b>НС унаслідок аварій на міському транспорті</b>
10181	НС унаслідок аварії на міському електротранспорті

10182	НС унаслідок аварії на міському пасажирському транспорті, іншому
<b>10200</b>	<b>НС УНАСЛІДОК ПОЖЕЖ, ВИБУХІВ</b>
<b>10210</b>	<b>НС унаслідок пожеж, вибухів у будівлях і спорудах</b>
10211	НС унаслідок пожежі, вибуху у споруді, на комунікації або технологічному устаткованні промислового об'єкта
10212	НС унаслідок пожежі, вибуху у будівлі або споруді нежитлової призначеності
10213	НС унаслідок пожежі, вибуху у будівлі або споруді житлової призначеності
<b>10220</b>	<b>НС унаслідок пожежі, вибуху на об'єкті розвідування, видобування, переробляння, транспортування чи зберігання легкозаймистих, горючих, а також вибухових речовин</b>
<b>10230</b>	<b>НС унаслідок пожеж, вибухів на транспорті</b>
10231	НС унаслідок пожежі, вибуху на залізниці
10232	НС унаслідок пожежі, вибуху на водному транспорті
10233	НС унаслідок пожежі, вибуху на повітряному транспорті
10234	НС унаслідок пожежі, вибуху на інших видах транспорту
<b>10240</b>	<b>НС унаслідок пожежі, вибуху у шахті, підземних і гірничих виробках</b>
<b>10250</b>	<b>НС унаслідок пожежі, вибуху на радіаційно, хімічно або біологічно небезпечному об'єкті без виливання (викидання) небезпечних речовин</b>
<b>10260</b>	<b>НС унаслідок пожежі, вибуху на арсеналі, складі боєприпасів або іншому об'єкті військової призначеності</b>
<b>10270</b>	<b>НС унаслідок пожежі, вибуху (можливості вибуху) виявлених вибухонебезпечних предметів (застарілих боєприпасів)</b>
<b>10300</b>	<b>НС УНАСЛІДОК АВАРІЙ З ВИКИДАННЯМ (ЗАГРОЗОЮ ВИКИДАННЯ) НХР, КОРИСНИХ КОПАЛИН НА ІНШИХ ОБ'ЄКТАХ (ОКРІМ АВАРІЙ НА ТРАНСПОРТІ)</b>
<b>10310</b>	<b>НС унаслідок аварії з викиданням (загрозою викидання), утворенням і розповсюдженням НХР під час їх виробляння, переробляння чи зберігання (захоронення)</b>
<b>10320</b>	<b>НС унаслідок аварії з викиданням (загрозою викидання) БНР на підприємстві промисловості або в науково-дослідній установі</b>
<b>10330</b>	<b>НС унаслідок аварії з викиданням корисних копалин, порід, гірничого удару у підземних виробках шахти</b>
<b>10400</b>	<b>НС УНАСЛІДОК НАЯВНОСТІ У НАВКОЛИШНЬОМУ СЕРЕДОВИЩІ ШКІДЛИВИХ (ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ) І РАДІОАКТИВНИХ РЕЧОВИН ПОНАД ГДК</b>
<b>10410</b>	<b>НС унаслідок наявності в ґрунті шкідливих (забруднювальних) речовин понад ГДК</b>

<b>10420</b>	<b>НС унаслідок наявності в повітрі шкідливих (забруднювальних) речовин понад ГДК</b>
10421	НС унаслідок наявності в атмосферному повітрі шкідливих (забруднювальних) речовин понад ГДК
10422	НС унаслідок наявності в повітрі підземних і гірничих виробок шкідливих (забруднювальних) речовин понад ГДК
10423	НС унаслідок наявності в повітрі підземних і гірничих виробок РР понад ГДК
<b>10430</b>	<b>НС унаслідок наявності у воді шкідливих (забруднювальних) речовин понад ГДК</b>
10431	НС унаслідок наявності в поверхневих водах шкідливих (забруднювальних) речовин понад ГДК
10432	НС унаслідок наявності в питній воді шкідливих (забруднювальних) речовин понад ГДК
10433	НС унаслідок наявності в підземних водах шкідливих (забруднювальних) речовин понад ГДК
10434	НС унаслідок наявності в підземних водах РР понад ГДК
<b>10500</b>	<b>НС УНАСЛІДОК АВАРІЙ З ВИКИДАННЯМ (ЗАГРОЗОЮ ВИКИДАННЯ) РР (крім аварій на транспорті)</b>
<b>10510</b>	<b>НС унаслідок аварії з викиданням (загрозою викидання) РР на атомній станції, атомній енергетичній установці виробничої або дослідної призначеності</b>
<b>10520</b>	<b>НС унаслідок аварії з викиданням (загрозою викидання) РР на підприємстві ядерно-паливного циклу (крім атомних електростанцій)</b>
<b>10530</b>	<b>НС унаслідок аварії з джерелом іонізуючого (іонізуючого) випромінювання (охоплюючи ядерно-паливний цикл)</b>
<b>10540</b>	<b>НС унаслідок аварії з радіоактивними відходами, що їх не виробляють атомні станції</b>
<b>10550</b>	<b>НС унаслідок аварії з радіоактивним джерелом іонізуючого (іонізуючого) випромінювання або РР (на підприємстві)</b>
<b>10560</b>	<b>НС унаслідок ядерної чи радіаційної аварії за межами України із загрозою забруднення її території</b>
<b>10600</b>	<b>НС УНАСЛІДОК РАПТОВОГО РУЙНУВАННЯ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД</b>
<b>10610</b>	<b>НС унаслідок руйнування елементів транспортних комунікацій</b>
<b>10620</b>	<b>НС унаслідок руйнування будівлі чи споруди виробничої призначеності</b>
<b>10630</b>	<b>НС унаслідок руйнування будівлі чи споруди нежитлової призначеності</b>
<b>10640</b>	<b>НС унаслідок руйнування будівлі чи споруди житлової при-</b>

	значеності
10650	НС унаслідок руйнування підземних споруд систем життєзабезпечення
10660	НС унаслідок руйнування підземних споруд шахти, підземних і гірничих виробок
10700	<b>НС УНАСЛІДОК АВАРІЙ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ</b>
10710	НС унаслідок аварій (радіаційних) на атомних електростанціях
10711	НС унаслідок події на атомній електричній станції
10720	НС унаслідок аварії на гідроелектростанції
10730	НС унаслідок аварії на теплоелектростанції
10740	НС унаслідок аварії на автономній електроенергетичній станції
10750	НС унаслідок аварії на інших електроенергетичних станціях
10760	НС унаслідок аварії в електричних мережах
10770	НС унаслідок втрати стійкості або розділення об'єднаної енергосистеми України на складові частини
10800	<b>НС УНАСЛІДОК АВАРІЙ У СИСТЕМАХ ЖИТТЄЗАБЕЗПЕЧЕННЯ</b>
10810	НС унаслідок аварії в каналізаційній системі із скиданням забруднювальних речовин
10820	НС унаслідок аварії в теплових мережах (системах гарячого водопостачання) холодної пори року
10830	НС унаслідок аварії в системах забезпечення населення питною водою
10840	НС унаслідок аварії на газопроводі систем газопостачання та газифікації
10900	<b>НС УНАСЛІДОК АВАРІЙ СИСТЕМ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ</b>
11000	<b>НС УНАСЛІДОК АВАРІЙ НА ОЧИСНИХ СПОРУДАХ</b>
11010	НС унаслідок аварії на очисних спорудах стічних вод із скиданням забруднювальних речовин
11020	НС унаслідок аварії на установці газоочищення джерел забруднення атмосфери з викиданням забруднювальних речовин в атмосферу
1100	<b>НС УНАСЛІДОК ГІДРОДИНАМІЧНИХ АВАРІЙ</b>
11110	НС унаслідок прориву греблі (дамби, шлюзу тощо) з утворенням хвилі прориву та катастрофічного затоплення
11120	НС унаслідок прориву греблі (дамби, шлюзу тощо) з утворенням проривної повені
11130	НС унаслідок аварійного спрацювання водосховища гідро-

	<b>електростанції у зв'язку із загрозою прориву гідропоруди</b>
<b>11200</b>	<b>НС УНАСЛІДОК АВАРІЙ У СИСТЕМАХ НАФТОГАЗОВОГО ПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ</b>
<b>11210</b>	<b>НС унаслідок аварії на буровій установці з виникненням відкритих нафтового та/чи газового фонтанів</b>
<b>11220</b>	<b>НС унаслідок аварії на свердловині із виникненням газонафтоводовиявлень</b>
<b>11230</b>	<b>НС унаслідок аварії на робочій свердловині з виникненням відкритих нафтового та/чи газового фонтанів</b>
<b>11240</b>	<b>НС унаслідок аварії на законсервованій свердловині з виникненням відкритих нафтового та/чи газового фонтанів</b>
<b>11250</b>	<b>НС унаслідок аварії на нафтобазі чи нафтосховищі</b>
<b>20000</b>	<b>НС ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ</b>
<b>20100</b>	<b>ГЕОФІЗИЧНІ НС</b>
<b>20110</b>	<b>НС, пов'язана з землетрусом</b>
<b>20200</b>	<b>ГЕОЛОГІЧНІ НС</b>
<b>20210</b>	<b>НС, пов'язана з виверженням грязьового вулкана</b>
<b>20220</b>	<b>НС, пов'язана зі зсувом</b>
<b>20230</b>	<b>НС, пов'язана з обвалом або осипом</b>
<b>20240</b>	<b>НС, пов'язана з осіданням (проваллям) земної поверхні</b>
<b>20250</b>	<b>НС, пов'язана з карстовими провалами</b>
<b>20260</b>	<b>НС, пов'язана з підвищенням рівня ґрунтових вод (підтопленням)</b>
<b>20300</b>	<b>МЕТЕОРОЛОГІЧНІ НС</b>
<b>20310</b>	<b>Метеорологічні НС, пов'язані з атмосферними опадами</b>
20311	НС, пов'язана з сильною зливою (кількість опадів 30 мм і більше, тривалістю 1 година і менше)
20312	НС, пов'язана з крупним градом (діаметром 20 мм і більше)
20313	НС, пов'язана з дуже сильним снігопадом (кількість опадів 20 мм і більше, тривалістю 12 годин і менше)
20314	НС, пов'язана з дуже сильним дощем (дощ і мокрий сніг) (кількість опадів 50 мм і більше, тривалістю 12 годин і менше; для гірських районів 30 мм і більше, тривалістю 12 годин і менше)
<b>20320</b>	<b>Метеорологічні НС температурні</b>
20321	НС, пов'язана з дуже сильним морозом (температура повітря мінус 30° С і нижче)
20322	НС, пов'язана з дуже сильною спекою (температура повітря 35° С і вище)
20323	НС, пов'язана з масовим засиханням та загибеллю посівів і створених 1 - 3-річних лісових культур, унаслідок засухи
20324	НС, пов'язана з масовим пошкодженням і загибеллю посівів, незібраним урожаєм, унаслідок заморозків
<b>20330</b>	<b>Метеорологічні НС, інші</b>

20331	НС, пов'язана з сильним вітром (швидкістю 25 м/с і більше), охоплюючи шквали та смерчі
20332	НС, пов'язана з сильною пиловою бурею (за швидкості вітру 15 м/с і більше, тривалістю 12 годин і більше)
20333	НС, пов'язана з сильним налипанням снігу (шар мокрого замерзлого снігу на деревах, стовбурах, дротах електромереж тощо діаметром 35 мм і більше)
20334	НС, пов'язана з сильною ожеледдю (шар льоду на деревах, дротах електромереж тощо діаметром 20 мм і більше)
20335	НС, пов'язана зі сніговими заметами (повне припинення руху транспорту на шляхах)
20336	НС, пов'язана з сильною хуртовиною (за швидкості вітру 15 м/с і більше, тривалістю 12 годин і більше)
20337	НС, пов'язана з сильним туманом (видимість менше 100 м, тривалістю 12 годин і більше)
<b>20400</b>	<b>ГІДРОЛОГІЧНІ МОРСЬКІ НС</b>
<b>20410</b>	<b>НС, пов'язана з сильним (високим) хвилюванням моря та на водосховищі</b>
<b>20420</b>	<b>НС, пов'язана з високим або низьким рівнем моря</b>
<b>20430</b>	<b>НС, пов'язана з раннім льодоставом або припаєм</b>
<b>20440</b>	<b>НС, пов'язана з загрозливим обледенінням суден</b>
<b>20500</b>	<b>ГІДРОЛОГІЧНІ НС ПОВЕРХНЕВИХ ВОД</b>
<b>20510</b>	<b>НС, пов'язана з високим рівнем води (водопілля, паводки)</b>
<b>20520</b>	<b>НС, пов'язана з маловоддям/посухою (маловоддя)</b>
<b>20530</b>	<b>НС, пов'язана з заторами, зажорами</b>
<b>20540</b>	<b>НС, пов'язана з селем</b>
<b>20550</b>	<b>НС, пов'язана зі сходом снігової лавини</b>
<b>20560</b>	<b>НС, пов'язана з низьким рівнем води</b>
<b>20570</b>	<b>НС, пов'язана з раннім льодоставом та появою льоду на судноплавних водоймах і річках</b>
<b>20580</b>	<b>НС, пов'язана з інтенсивним льодоходом</b>
<b>20590</b>	<b>НС, пов'язана з затопленням</b>
<b>20600</b>	<b>НС, ПОВ'ЯЗАНІ З ПОЖЕЖАМИ В ПРИРОДНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ</b>
<b>20610</b>	<b>НС, пов'язана з лісовою пожежею</b>
<b>20620</b>	<b>НС, пов'язана з пожежею степовою</b>
<b>20630</b>	<b>НС, пов'язана з пожежею польовою (на сільськогосподарських угіддях)</b>
<b>20640</b>	<b>НС, пов'язана з пожежею на торфовищі</b>
<b>20700</b>	<b>МЕДИКО-БІОЛОГІЧНІ НС</b>
<b>20710</b>	<b>НС, пов'язані з інфекційним захворюванням людей</b>
20711	НС, пов'язана з екзотичним та особливо небезпечним інфекційним захворюванням людей (окремі випадки)



20712	НС, пов'язана з небезпечною інфекційною хворобою (групові випадки)
20713	НС, пов'язана з епідемічним спалахом небезпечних інфекційних хвороб
20714	НС, пов'язана з епідемією
20715	Пандемія
20716	НС, пов'язана з інфекційним захворюванням людей невизначеної етіології
<b>20720</b>	<b>НС, пов'язані з отруєнням людей</b>
20721	НС, пов'язана з отруєнням людей у результаті споживання неякісних продуктів харчування
20722	НС, пов'язана з отруєнням людей у результаті споживання неякісної питної води
20723	НС, пов'язана з отруєнням людей токсичними або іншими речовинами (окремі випадки)
20724	НС, пов'язана з отруєнням людей токсичними або іншими речовинами (групові випадки)
20725	НС, пов'язана з отруєнням людей токсичними або іншими небезпечними речовинами (масові випадки)
<b>20730</b>	<b>НС, пов'язані з інфекційними захворюваннями сільськогосподарських тварин</b>
20731	НС, пов'язана з окремим випадком екзотичного та особливо небезпечного інфекційного захворювання сільськогосподарських тварин
20732	НС, пов'язана з ензоотією
20733	НС, пов'язана з епізоотією
20734	Панзоотія
20735	НС, пов'язана з інфекційним захворюванням сільськогосподарських тварин невизначеної етіології
20736	НС, пов'язана з інфекційним захворюванням риб невизначеної етіології
<b>20740</b>	<b>НС, пов'язана з масовим отруєнням сільськогосподарських тварин</b>
<b>20750</b>	<b>НС, пов'язана з масовою загибеллю диких тварин</b>
<b>20760</b>	<b>НС, пов'язана з ураженням сільськогосподарських рослин хворобами та шкідниками</b>
20761	Панфітотія
20762	НС, пов'язана з прогресивною епіфітотією
20763	НС, пов'язана з хворобою сільськогосподарських рослин невизначеної етіології
20764	НС, пов'язана з масовим розповсюдженням шкідників сільськогосподарських рослин
<b>30000</b>	<b>НС СОЦІАЛЬНОГО ХАРАКТЕРУ</b>

<b>30100</b>	<b>ЗБРОЙНІ НАПАДИ, ЗАХОПЛЕННЯ Й УТРИМУВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ДЕРЖАВНОГО ЗНАЧЕННЯ (НАЙВАЖЛИВІШИХ І ВАЖЛИВИХ ДЕРЖАВНИХ ОБ'ЄКТІВ) АБО РЕАЛЬНА ЗАГРОЗА ЗДІЙСНЕННЯ ТАКИХ АКЦІЙ</b>
<b>30110</b>	<b>Збройний напад, захоплення й утримування органу державної влади або реальна загроза здійснення такої акції</b>
<b>30120</b>	<b>Збройний напад, захоплення й утримування дипломатичної чи консульської установи або реальна загроза здійснення такої акції</b>
<b>30130</b>	<b>Збройний напад, захоплення й утримування установи правоохоронних органів або реальна загроза здійснення такої акції</b>
<b>30140</b>	<b>Збройний напад, захоплення й утримування телерадіоцентру чи вузла зв'язку або реальна загроза здійснення такої акції</b>
<b>30150</b>	<b>Збройний напад, захоплення й утримування органу військового управління, військової частини, військового навчального закладу, установи та організації Збройних Сил України або реальна загроза здійснення такої акції</b>
<b>30160</b>	<b>Збройний напад, захоплення й утримування державного закладу або реальна загроза здійснення такої акції</b>
<b>30170</b>	<b>Збройний напад, захоплення й утримування об'єкта атомної енергетики, хімічної промисловості та об'єкта, на якому виробляють чи зберігають біологічно небезпечні речовини, або реальна загроза здійснення такої акції</b>
<b>30200</b>	<b>ПОСЯГАННЯ НА ЖИТТЯ ДЕРЖАВНОГО ЧИ ГРОМАДСЬКОГО ДІЯЧА</b>
<b>30300</b>	<b>НАПАД, ЗАМАХ НА ЖИТТЯ ЧЛЕНІВ ЕКІПАЖУ ПОВІТРЯНОГО АБО МОРСЬКОГО (РІЧКОВОГО) СУДНА, ВИКРАДЕННЯ (СПРОБА ВИКРАДЕННЯ), ЗНИЩЕННЯ (СПРОБА ЗНИЩЕННЯ) ТАКОГО СУДНА, ЗАХОПЛЕННЯ ЗАРУЧНИКІВ З-ПОМІЖ ЧЛЕНІВ ЕКІПАЖУ ЧИ ПАСАЖИРІВ</b>
<b>30400</b>	<b>УСТАНОВЛЕННЯ ВИБУХОВОГО ПРИСТРОЮ У БАГАТОЛЮДНОМУ МІСЦІ, УСТАНОВІ (ОРГАНІЗАЦІЇ, ПІДПРИЄМСТВІ), ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ, ТРАНСПОРТ!</b>
<b>30500</b>	<b>НС, ПОВ'ЯЗАНІ ЗІ ЗНИКНЕННЯМ ЧИ ВИКРАДЕННЯМ ЗБРОЇ ТА НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН З ОБ'ЄКТІВ ЇХ ЗБЕРІГАННЯ, ВИКОРИСТАННЯ, ПЕРЕРОБЛАННЯ АБО ПІД ЧАС ТРАНСПОРТУВАННЯ</b>
<b>30510</b>	<b>НС, пов'язана зі зникненням чи викраденням технічних одиниць вогнепальної зброї з об'єкта зберігання, використання, перероблення або під час транспортування</b>

<b>30520</b>	<b>НС, пов'язана зі зникненням чи викраденням боєприпасів з об'єкта зберігання, використання, перероблення або під час транспортування</b>
<b>30530</b>	<b>НС, пов'язана зі зникненням чи викраденням бронетехніки з об'єкта зберігання, використання, перероблення або під час транспортування</b>
<b>30540</b>	<b>НС, пов'язана зі зникненням чи викраденням артозброєння з об'єкта зберігання, використання, перероблення або під час транспортування</b>
<b>30550</b>	<b>НС, пов'язана зі зникненням чи викраденням вибухових матеріалів з об'єкта зберігання, використання, перероблення або під час транспортування</b>
<b>30560</b>	<b>НС, пов'язана зі зникненням чи викраденням РР (приладів або устаткування, з використанням РР) з об'єкта зберігання, використання, перероблення та під час транспортування</b>
<b>30570</b>	<b>НС, пов'язана зі зникненням чи викраденням небезпечних хімічних речовин (приладів або устаткування, де їх використовують) з об'єкта зберігання, використання, перероблення або під час транспортування</b>
<b>30580</b>	<b>НС, пов'язана зі зникненням чи викраденням наркотичних речовин, препаратів і наркотичної сировини з об'єкта зберігання, використання, перероблення або під час транспортування</b>
<b>30600</b>	<b>НС, ПОВ'ЯЗАНІ З НЕЩАСНИМИ ВИПАДКАМИ З ЛЮДЬМИ</b>
<b>30610</b>	<b>НС, пов'язана з нещасним випадком під час виконання трудових обов'язків</b>
<b>30620</b>	<b>НС, пов'язана з нещасним випадком у лісних, гірських масивах, печерах та інших важкодоступних місцях</b>
<b>30630</b>	<b>НС, пов'язана з нещасним випадком з людьми на воді</b>
<b>30640</b>	<b>НС унаслідок відриву прибережного льоду з людьми</b>
<b>30650</b>	<b>НС, пов'язана з викраденням людей</b>
<b>30660</b>	<b>НС, пов'язана з захопленням заручників</b>
<b>30670</b>	<b>НС, пов'язана зі зникненням людей</b>
<b>30680</b>	<b>НС, пов'язана з нещасним випадком, іншим</b>
<b>40000</b>	<b>НС ВОЄННОГО ХАРАКТЕРУ</b>

# ПОРЯДОК КЛАСИФІКАЦІЇ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ЗА ЇХ РІВНЯМИ

(Затверджено постановою Кабінету Міністрів України  
від 24 березня 2004 р. № 368)

1. *Класифікація надзвичайних ситуацій* (далі – надзвичайна ситуація) за їх рівнями здійснюється для забезпечення організації взаємодії центральних і місцевих органів виконавчої влади, підприємств, установ та організацій у процесі вирішення питань, пов'язаних з надзвичайними ситуаціями та ліквідацією їх наслідків.

{Пункт 1 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 380 (380-2013-п) від 29.05.2013}

1-1. У цьому Порядку наведені нижче терміни вживаються у такому значенні:

*уражальний чинник джерела надзвичайної ситуації* – складова частина небезпечного явища або процесу, що характеризується фізичною, хімічною, біологічною чи іншою дією (впливом) та перевищенням нормативних показників;

*порушення нормальних умов життєдіяльності* – відсутність питного водопостачання, водовідведення, електро-, газо- і тепlopостачання (в осінньо-зимовий період) та/або така зміна технічного стану житлового будинку (приміщення), внаслідок якої він став аварійним або не придатним до експлуатації, та/або зміна стану території (об'єкта), внаслідок якої проживання населення і провадження господарської діяльності на території (об'єкті) є неможливим.

{Порядок доповнено пунктом 1-1 згідно з Постановою КМ № 297 (297-2009-п) від 02.04.2009}

2. Залежно від обсягів заподіяних наслідків, технічних і матеріальних ресурсів, необхідних для їх ліквідації, надзвичайна ситуація класифікується як державного, регіонального, місцевого або об'єктового рівня.

3. Для визначення рівня надзвичайної ситуації встановлюються такі критерії:

1) територіальне поширення та обсяги технічних і матеріальних ресурсів, що необхідні для ліквідації наслідків надзвичайної ситуації;

2) кількість людей, які внаслідок дії уражальних чинників джерела надзвичайної ситуації загинули або постраждали, або нормальні умови життєдіяльності яких порушено;

{Підпункт 2 пункту 3 в редакції Постанови КМ № 297 (297-2009-п) від 02.04.2009 }

3) розмір збитків, завданих уражальними чинниками джерела надзвичайної ситуації, розраховується відповідно до Методики оцінки збитків від наслідків надзвичайних ситуацій техногенного і природного характеру, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 15 лютого 2002 р. № 175 (175-2002-п) (Офіційний вісник України, 2002 р., № 18, ст. 356; 2003 р., № 23, ст. 1070).

{Підпункт 3 пункту 3 в редакції Постанови КМ № 297 (297-2009-п) від 02.04.2009 }

#### 4. Державного рівня визнається надзвичайна ситуація:

1) яка поширилась або може поширитися на територію інших держав;

2) яка поширилась на територію двох чи більше регіонів України (Автономної Республіки Крим, областей, м. Києва та Севастополя), а для її ліквідації необхідні матеріальні і технічні ресурси в обсягах, що перевищують можливості цих регіонів, але не менш як 1 відсоток від обсягу видатків відповідних місцевих бюджетів (надзвичайна ситуація державного рівня за територіальним поширенням);

3) яка призвела до загибелі понад 10 осіб або внаслідок якої постраждало понад 300 осіб (постраждалі – особи, яким внаслідок дії уражальних чинників джерела надзвичайної ситуації завдано тілесне ушкодження або які захворіли, що призвело до втрати працездатності, засвідченої в установленому порядку) чи було порушено нормальні умови життєдіяльності понад 50 тис. осіб на тривалий час (більш як на 3 доби);

{Підпункт 3 пункту 4 в редакції Постанови КМ № 297 (297-2009-п) від 02.04.2009 }

4) внаслідок якої загинуло понад 5 осіб або постраждало понад 100 осіб, чи було порушено нормальні умови життєдіяльності понад 10 тис. осіб на тривалий час (більш як на 3 доби), а збитки (оцінені в установленому законодавством порядку), спричинені надзвичайною ситуацією, перевищили 25 тис. мінімальних розмірів (на час виникнення надзвичайної ситуації) заробітної плати;

5) збитки від якої перевищили 150 тис. мінімальних розмірів заробітної плати;

б) яка в інших випадках, передбачених актами законодавства, за своїми ознаками визнається як надзвичайна ситуація державного рівня.

*5. Регіонального рівня визнається надзвичайна ситуація:*

1) яка поширилась на територію двох чи більше районів (міст обласного значення) Автономної Республіки Крим, областей, а для її ліквідації необхідні матеріальні і технічні ресурси в обсягах, що перевищують можливості цих районів, але не менш як 1 відсоток обсягу видатків відповідних місцевих бюджетів (надзвичайна ситуація регіонального рівня за територіальним поширенням);

2) яка призвела до загибелі від 3 до 5 осіб або внаслідок якої постраждало від 50 до 100 осіб, чи було порушено нормальні умови життєдіяльності від 1 тис. до 10 тис. осіб на тривалий час (більш як на 3 доби), а збитки перевищили 5 тис. мінімальних розмірів заробітної плати;

3) збитки від якої перевищили 15 тис. мінімальних розмірів заробітної плати.

*6. Місцевого рівня визнається надзвичайна ситуація:*

1) яка вийшла за межі територій потенційно небезпечного об'єкта, загрожує довкіллю, сусіднім населеним пунктам, інженерним спорудам, а для її ліквідації необхідні матеріальні і технічні ресурси в обсягах, що перевищують власні можливості потенційно небезпечного об'єкта;

2) внаслідок якої загинуло 1–2 особи або постраждало від 20 до 50 осіб, чи було порушено нормальні умови життєдіяльності від 100 до 1000 осіб на тривалий час (більш як на 3 доби), а збитки перевищили 0,5 тис. мінімальних розмірів заробітної плати;

3) збитки від якої перевищили 2 тис. мінімальних розмірів заробітної плати.

7. Об'єктового рівня визнається надзвичайна ситуація, яка не підпадає під названі вище визначення.

8. Надзвичайна ситуація відноситься до певного рівня за умови відповідності їй хоча б одному із значень критеріїв, наведеному у пунктах 4–7 цього Порядку.

9. У разі коли внаслідок надзвичайної ситуації для відповідних порогових значень рівнів людських втрат або кількості осіб, які постраждали чи зазнали порушення нормальних умов життєдіяльності, обсяг збитків не досягає визначеного у цьому Порядку, рівень надзвичайної ситуації визнається на ступінь менше (для дорожньо-транспортних пригод – на два ступеня менше).

10. Віднесення надзвичайної ситуації, яка виникла на території кількох адміністративно-територіальних одиниць, до державного та регіонального рівня за територіальним поширенням або за сумарними показниками її наслідків не є підставою для віднесення надзвичайної ситуації до державного або регіонального рівня окремо для кожної з цих адміністративно-територіальних одиниць. Віднесення надзвичайної ситуації до державного та регіонального рівня для зазначених адміністративно-територіальних одиниць здійснюється окремо за критеріями та правилами, зазначеними у пунктах 4–9 цього Порядку.

11. Остаточне рішення щодо визначення рівня надзвичайної ситуації з подальшим відображенням його у даних статистики, зокрема у разі відсутності відомостей у повному обсязі стосовно розвитку надзвичайної ситуації, приймає ДСНС з урахуванням експертного висновку (за наявності) регіональної комісії з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій.

{Абзац перший пункту 11 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 380 (380-2013-п) від 29.05.2013}

Експертний висновок про рівень надзвичайної ситуації готується ДСНС за дорученням Кабінету Міністрів України.

{Абзац другий пункту 11 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ №380 (380-2013-п) від 29.05.2013}

ДСНС має право звернутися до центральних органів виконавчої влади за інформацією про розмір завданих збитків. Відповідальність за достовірність інформації несе орган виконавчої влади, який її подає.

{Абзац третій пункту 11 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 380 (380-2013-п) від 29.05.2013}

У разі аварійної події (пригоди), що сталася з транспортним засобом, або аварії на виробництві (незалежно від форми власності) до інформації центрального органу виконавчої влади додається акт розслідування такої події (пригоди) або аварії, проведеного в установленому законодавством порядку.

Остаточне рішення (експертний висновок) ДСНС є підставою для здійснення інших заходів щодо реагування на надзвичайну ситуацію відповідно до законодавства.

{Абзац п'ятий пункту 11 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 380 (380-2013-п) від 29.05.2013}

## ПРИКЛАД ПОБУДОВИ КЛАСИЧНОЇ НОРМАЛЬНОЇ ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ МНОЖИННОЇ РЕГРЕСІЇ

Розглянемо випадок, коли змінна  $Y$  залежить від двох факторних змінних  $X_1$  і  $X_2$ . У якості факторних змінних можуть розглядатися, наприклад, характеристики діяльності підрозділів цивільного захисту (кількість проведених пожежно-технічних перевірок, кількість заходів з масово-роз'яснювальної роботи тощо). Залежна змінна  $Y$  може являти собою певний показник ефективності функціонування відповідного підрозділу. Таким чином, розглянемо множинну регресію із двома пояснюючими факторами:

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x_{i1}$	8	11	12	9	8	8	9	9	8	12
$x_{i2}$	5	8	6	5	7	8	6	4	5	7
$y_i$	5	10	10	7	5	6	6	5	6	8

Знайдемо рівняння регресії  $Y$  по  $X_1$  і  $X_2$ , при цьому будемо вважати, що між ними існує лінійна кореляційна залежність.

Необхідно зазначити, що для розв'язання даної задачі необхідно скласти дві матриці –  $X$  і  $Y$  (див. п. 3.3.3):

$$X = \begin{pmatrix} 1 & 8 & 5 \\ 1 & 11 & 8 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & 12 & 7 \end{pmatrix}, \quad Y = \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ \dots \\ 8 \end{pmatrix}.$$

Для зручності подальших обчислень складемо наступну допоміжну таблицю:

$i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	$y_i$	$x_{i1}^2$	$x_{i2}^2$	$y_i^2$	$x_{i1} x_{i2}$	$y_i x_{i1}$	$y_i x_{i2}$
1	8	5	5	64	25	25	40	40	25
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
10	12	7	8	144	49	64	84	96	56
$\Sigma$	94	63	68	908	417	496	603	664	445

Тоді

$$X^T X = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 8 & 11 & \dots & 12 \\ 5 & 8 & \dots & 7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 8 & 5 \\ 1 & 11 & 8 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & 12 & 7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & 94 & 63 \\ 94 & 908 & 603 \\ 63 & 603 & 417 \end{pmatrix},$$



$$X^T Y = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 8 & 11 & \dots & 12 \\ 5 & 8 & \dots & 7 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 5 \\ 10 \\ \dots \\ 8 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 68 \\ 664 \\ 445 \end{pmatrix}.$$

Для того, щоб визначити матрицю – стовбець параметрів класичної нормальної лінійної моделі множинної регресії, необхідно обчислити зворотню матрицю  $(X^T X)^{-1}$ :

$$(X^T X)^{-1} = \frac{1}{3738} \begin{pmatrix} 15027 & -1209 & -522 \\ -1209 & 201 & -108 \\ -522 & -108 & 244 \end{pmatrix}.$$

Таким чином,

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{pmatrix} -3,5393 \\ 0,8539 \\ 0,3670 \end{pmatrix}.$$

Рівняння множинної регресії в цьому випадку має вигляд:

$$\hat{y} = -3,54 + 0,854x_1 + 0,367x_2.$$

Для порівняння впливу на залежну змінну різних пояснюючих змінних використовують стандартизовані коефіцієнти регресії  $b'_j$  та коефіцієнти еластичності  $E_j$ :

$$b'_j = b_j \frac{s_{x_j}}{s_y}, \quad E_j = b_j \frac{\bar{x}_j}{\bar{y}}.$$

Стандартизований коефіцієнт регресії  $b'_j$  показує, на скільки одиниць  $s_y$  зміниться в середньому залежна змінна  $Y$ , коли  $X_j$  зміниться на одне  $s_{x_j}$ , а коефіцієнт еластичності  $E_j$  – на скільки відсотків зміниться в середньому  $Y$  при збільшенні  $X_j$  на 1%.

Для розглянутого вище прикладу  $b'_1 = 0,728$ ,  $b'_2 = 0,285$ ,  $E_1 = 1,180$ ,  $E_2 = 0,340$ . Таким чином, по обох показниках більш істотний вплив на змінну  $Y$  здійснює факторна змінна  $X_1$ .

Завдання для самостійної роботи

Задача 1

№ п/п	y	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	
1	6,6	83,6	222	<p>I. Парна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) коефіцієнт кореляції;</p> <p>в) середню величину y при <math>x = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p> <p>II. Множинна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) стандартизовані коефіцієнти регресії та коефіцієнти еластичності;</p> <p>в) середнє значення y при <math>x_1 = \text{const}</math>, <math>x_2 = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p>
2	3,0	6,5	32	
3	6,5	50,4	82	
4	3,3	15,4	45,2	
5	0,1	29,6	299,3	
6	3,6	13,3	41,6	
7	1,5	5,9	17,8	
8	5,5	27,1	151	
9	2,4	11,2	22,3	
10	3,0	16,4	103	
11	4,2	32,5	225,4	
12	2,7	25,4	675	
13	1,6	6,4	43,8	
14	2,4	12,5	102,3	
15	3,3	14,3	105	
16	1,8	6,5	49,1	
17	2,4	22,7	50,4	
18	1,6	15,8	480	

Задача 2

№ п/п	y	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	
1	6,6	6,9	222	<p>I. Парна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) коефіцієнт кореляції;</p> <p>в) середню величину y при <math>x = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p> <p>II. Множинна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) стандартизовані коефіцієнти регресії та коефіцієнти еластичності;</p> <p>в) середнє значення y при <math>x_1 = \text{const}</math>, <math>x_2 = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p>
2	3,0	18	32	
3	6,5	107,9	82	
4	3,3	16,7	45,2	
5	0,1	79,6	299,3	
6	3,6	16,2	41,6	
7	1,5	5,9	17,8	
8	5,5	53,1	151	
9	2,4	18,8	22,3	
10	3,0	35,3	103	
11	4,2	71,9	225,4	
12	2,7	93,6	675	
13	1,6	10	43,8	
14	2,4	31,5	102,3	
15	3,3	36,7	105	
16	1,8	13,8	49,1	
17	2,4	64,8	50,4	
18	1,6	30,4	480	

### Задача 3

№ п/п	у	$x_1$	$x_2$	
1	6,6	6,9	83,6	
2	3,0	18	6,5	I. Парна регресія.
3	6,5	107,9	50,4	1. Знайти:
4	3,3	16,7	15,4	а) рівняння лінійної регресії;
5	0,1	79,6	29,6	б) коефіцієнт кореляції;
6	3,6	16,2	13,3	в) середню величину $y$ при $x = \text{const}$ .
7	1,5	5,9	5,9	2. Зробити аналіз одержаних результатів.
8	5,5	53,1	27,1	
9	2,4	18,8	11,2	II. Множинна регресія.
10	3,0	35,3	16,4	1. Знайти:
11	4,2	71,9	32,5	а) рівняння лінійної регресії;
12	2,7	93,6	25,4	б) стандартизовані коефіцієнти регресії та коефіцієнти еластичності;
13	1,6	10	6,4	в) середнє значення $y$ при $x_1 = \text{const}$ , $x_2 = \text{const}$ .
14	2,4	31,5	12,5	2. Зробити аналіз одержаних результатів.
15	3,3	36,7	14,3	
16	1,8	13,8	6,5	
17	2,4	64,8	22,7	
18	1,6	30,4	15,8	

### Задача 4

№ п/п	у	$x_1$	$x_2$	
1	0,9	31,3	18,9	
2	1,7	13,4	13,7	I. Парна регресія.
3	0,7	4,5	18,5	1. Знайти:
4	1,7	10	4,8	а) рівняння лінійної регресії;
5	2,6	20	21,8	б) коефіцієнт кореляції;
6	1,3	15	5,8	в) середню величину $y$ при $x = \text{const}$ .
7	4,1	137,1	99	2. Зробити аналіз одержаних результатів.
8	1,6	17,9	20,1	
9	6,9	165,4	60,6	II. Множинна регресія.
10	0,4	2	1,4	1. Знайти:
11	1,3	6,8	8	а) рівняння лінійної регресії;
12	1,9	37,1	18,9	б) стандартизовані коефіцієнти регресії та коефіцієнти еластичності;
13	1,9	13,4	13,2	в) середнє значення $y$ при $x_1 = \text{const}$ , $x_2 = \text{const}$ .
14	1,4	9,8	12,6	2. Зробити аналіз одержаних результатів.
15	0,4	19,5	12,2	
16	0,8	6,8	3,2	
17	1,8	27	13	
18	0,9	12,4	6,9	

Задача 5

№ п/п	у	$x_1$	$x_2$	
1	0,9	31,3	43	<p>I. Парна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) коефіцієнт кореляції;</p> <p>в) середню величину <math>y</math> при <math>x = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p> <p>II. Множинна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) стандартизовані коефіцієнти регресії та коефіцієнти еластичності;</p> <p>в) середнє значення <math>y</math> при <math>x_1 = \text{const}</math>, <math>x_2 = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p>
2	1,7	13,4	64,7	
3	0,7	4,5	24	
4	1,7	10	50,2	
5	2,6	20	106	
6	1,3	15	96,6	
7	4,1	137,1	347	
8	1,6	17,9	85,6	
9	6,9	165,4	745	
10	0,4	2	4,1	
11	1,3	6,8	26,8	
12	1,9	37,1	42,7	
13	1,9	13,4	61,8	
14	1,4	9,8	212	
15	0,4	19,5	105	
16	0,8	6,8	33,5	
17	1,8	27	142	
18	0,9	12,4	96	

Задача 6

№ п/п	у	$x_1$	$x_2$	
1	0,9	18,9	43	<p>I. Парна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) коефіцієнт кореляції;</p> <p>в) середню величину <math>y</math> при <math>x = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p> <p>II. Множинна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) стандартизовані коефіцієнти регресії та коефіцієнти еластичності;</p> <p>в) середнє значення <math>y</math> при <math>x_1 = \text{const}</math>, <math>x_2 = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p>
2	1,7	13,7	64,7	
3	0,7	18,5	24	
4	1,7	4,8	50,2	
5	2,6	21,8	106	
6	1,3	5,8	96,6	
7	4,1	99	347	
8	1,6	20,1	85,6	
9	6,9	60,6	745	
10	0,4	1,4	4,1	
11	1,3	8	26,8	
12	1,9	18,9	42,7	
13	1,9	13,2	61,8	
14	1,4	12,6	212	
15	0,4	12,2	105	
16	0,8	3,2	33,5	
17	1,8	13	142	
18	0,9	6,9	96	

Задача 7

№ п/п	y	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	
1	0,9	31,3	40,9	<p>I. Парна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) коефіцієнт кореляції;</p> <p>в) середню величину <math>y</math> при <math>x = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p> <p>II. Множинна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) стандартизовані коефіцієнти регресії та коефіцієнти еластичності;</p> <p>в) середнє значення <math>y</math> при <math>x_1 = \text{const}</math>, <math>x_2 = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p>
2	1,7	13,4	40,5	
3	0,7	4,5	38,9	
4	1,7	10	38,5	
5	2,6	20	37,3	
6	1,3	15	26,5	
7	4,1	137,1	37	
8	1,6	17,9	36,8	
9	6,9	165,4	36,3	
10	0,4	2	35,3	
11	1,3	6,8	35,3	
12	1,9	27,1	35	
13	1,9	13,4	26,2	
14	1,4	9,8	33,1	
15	0,4	19,5	32,7	
16	0,8	6,8	32,1	
17	1,8	27	30,5	
18	0,9	12,4	29,8	

Задача 8

№ п/п	y	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	
1	0,9	18,9	40,9	<p>I. Парна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) коефіцієнт кореляції;</p> <p>в) середню величину <math>y</math> при <math>x = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p> <p>II. Множинна регресія.</p> <p>1. Знайти:</p> <p>а) рівняння лінійної регресії;</p> <p>б) стандартизовані коефіцієнти регресії та коефіцієнти еластичності;</p> <p>в) середнє значення <math>y</math> при <math>x_1 = \text{const}</math>, <math>x_2 = \text{const}</math>.</p> <p>2. Зробити аналіз одержаних результатів.</p>
2	1,7	13,7	40,5	
3	0,7	18,5	38,9	
4	1,7	4,8	38,5	
5	2,6	21,8	37,3	
6	1,3	5,8	26,5	
7	4,1	99	37	
8	1,6	20,1	36,8	
9	6,9	60,6	36,3	
10	0,4	1,4	35,3	
11	1,3	8	35,3	
12	1,9	18,9	35	
13	1,9	13,2	26,2	
14	1,4	12,6	33,1	
15	0,4	12,2	32,7	
16	0,8	3,2	32,1	
17	1,8	13	30,5	
18	0,9	6,9	29,8	

## ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ХВИЛІ ПРОРИВУ

В результаті землетрусу на річці повністю зруйнований гідровузол (розрахункова схема див. рис. Д.2.1).

Характеристика водосховища і річки нижче дамби:

- об'єм водосховища  $W_v$  - 72 млн.м<sup>3</sup>;
- ширина водосховища перед дамбою  $B$  - 110 м;
- глибина водосховища перед гідровузлом  $H$  - 42 м;
- глибина річки нижче дамби  $h_b$  - 3,2 м;
- швидкість перебігу  $V_b = 1$  м/с;
- форма (перетину) долини в створі гідровузла - параболічна;
- річка рівнинна з добре розробленим руслом, заплави вузькі, місцями середні, без великих опорів;
- на ділянці  $L = 0 - 25$  км.  $i = 0,0012$ , далі  $L=25 - 45$  км.  $i = 0,001$ .

*Потрібно визначити:*

- параметри хвилі прориву на ділянці річки у 45 км. і побудувати графік її руху;
- час, протягом якого можлива евакуація населення з населеного пункту К, якщо він розташований на відстані 30 км. від гідровузла, і час використання для евакуації дерев'яного моста, розташованого на відстані 35 км. від гідровузла;
- характер руйнувань в населеному пункті;
- час початку рятувальних робіт з використанням плавзасобів, що мають швидкість, допустиму для використання при швидкості перебігу річки менше 1 м/с, і не плаваючої техніки;
- межі можливих затоплень.

Характеристика русла і заплави	$i=0,01$	$i=0,001$	$i=0,0001$
На річках з широкими затопленими заплавами	4 - 8	1 - 3	0,5 - 1
На звивистих річках із зарослими або нерівними кам'янистими заплавами, з розширеннями і звуженнями заплав	8 - 14	3 - 8	1 - 2
На річках з добре розробленим руслом, з вузькими і середніми заплавами без великих опорів	14 - 20	8 - 12	2 - 5
На малозвивистих річках з крутими берегами і вузькими заплавами	24 - 18	12 - 16	5 - 10

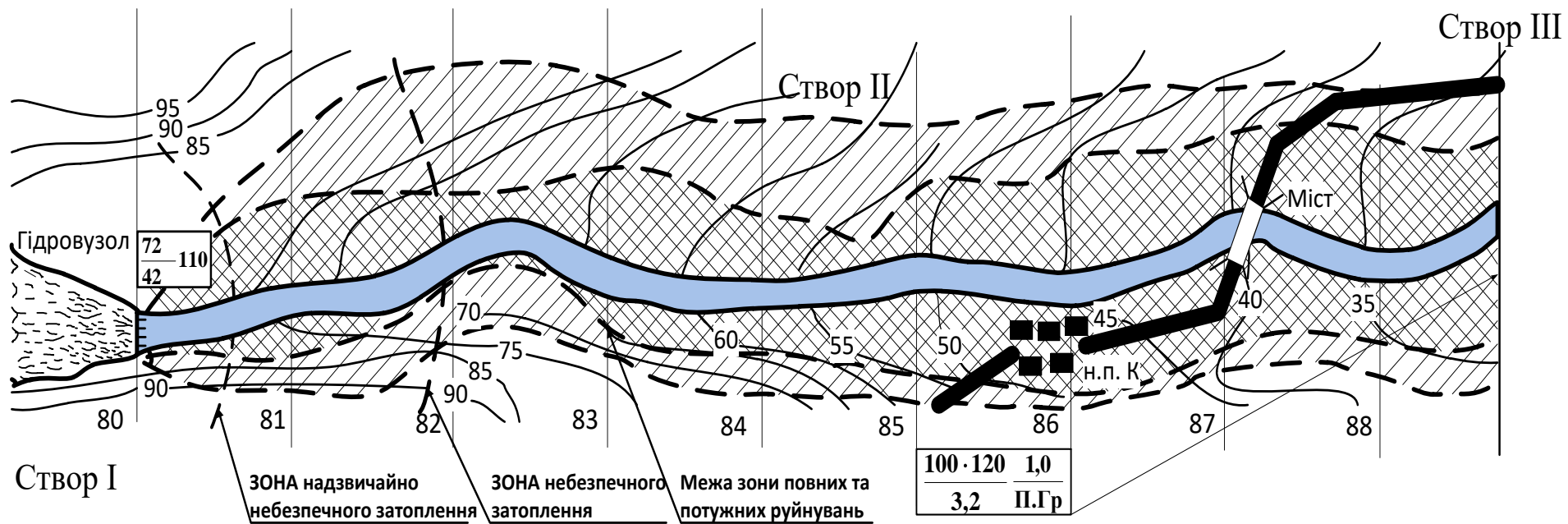


Рис. Д.2.1 – Розрахункова схема ділянки річки

На основі початкових даних ділянка річки протяжністю 45 км. доцільно розбити на дві розрахункові ділянки і три створи. Перша ділянка  $L_1 = 25$  км. ( $i=0,0012$ ) і другий  $L_2 = 20$  км. ( $i=0,001$ ). Перший створ - створ зруйнованої дамби, другий створ - між 1-ою і 2-ою ділянками і третій створ - в кінці другої ділянки.

Визначаємо параметри хвилі прориву в створі повного руйнування гідровузла (1 створ):

а) Знаходимо висоту хвилі прориву  $H_{ВІ}$

$$H_{ВІ} = 0,6 H - h_1 = 0,642 - 3,2 = 22 \text{ м.}$$

б) Визначаємо час проходження хвилі прориву через створ зруйнованої дамби (час повного спорожнення водосховища). Для орієнтовного розрахунку коефіцієнта, що характеризує форму кривизни водосховища,  $A$  приймаємо рівним 2. При параболічній формі русла і заплави в 1 створі коефіцієнт  $\mu = 0,6$

$$T_1 = \frac{W_B \cdot A}{3600 \cdot \mu \cdot B \cdot H \cdot \sqrt{H}} = \frac{72000000 \cdot 2}{3600 \cdot 0,6 \cdot 110 \cdot 42 \cdot \sqrt{42}} = 2,2 \text{ г.}$$

Знаходимо основні дані руху хвилі прориву на першій ділянці і параметри, що характеризують її в другому створі:

а) час добігання хвилі до другого створу ( $t_1$ ).

Для річки з добре розробленим руслом, з вузькими заплавами без великих опорів, при ухилі дна  $i=0,0012$  середня швидкість руху хвилі на першій ділянці рівна  $V_1 = 10$  км/ч (див. табл. 4.2).

$$t_1 = \frac{L_1}{V_1} = \frac{25}{10} = 2,5 \text{ г.}$$

б) висоту хвилі прориву в другому створі ( $H_{ВІІ}$ ).

Для цього на початку знаходимо значення відношення часу добігання хвилі до другого створу  $t_1$  до часу повного спорожнення водосховища  $T_1$

$$\frac{t_1}{T_1} = \frac{2,5}{2,22} = 1,1 \text{ г.}$$

Потім по таблиці Д.2.1 знаходимо відповідні цьому відношенню значення інших співвідношень:



Таблиця Д.2.1 – Значення співвідношень висоти хвилі прориву і тривалість її проходження через створ

$t1/TI$	НВІІ/НВІ	ТІІ/ТІ
0,00	1	1
0,1	0,9	1,1
0,25	0,8	1,3
0,4	0,7	1,5
0,55	0,6	1,6
0,7	0,5	1,7
0,95	0,4	1,9
1,25	0,3	2,2
1,5	0,3	2,6

Примітка:

1. При великих значеннях  $t1/TI$  орієнтовно можна приймати  $НВІІ/НВІ=0,3$ , а  $ТІІ/ТІ = 2,6 - 3$ .

2. Дані таблиці справедливі тільки для другого створу, при визначенні параметрів хвилі в третьому створі  $t1/TI$  замінюється відношенням  $t2/TII + t1$ , а в четвертому  $t3/TIII + t1 + t2$  і так далі.

Використовуючи метод інтерполяції, знаходимо значення  $НВІІ/НВІ$  і  $ТІІ/ТІ$ , відповідні відношенню  $НВІІ/НВІ = 0,35$  звідки

$$НВІІ = 0,35НВІ = 0,3522 = 7,7 \text{ м.}$$

в) час проходження хвилі прориву через другий створ. По таблиці  $ТІІ/ТІ = 2,05$ , звідки

$$ТІІ = 2,05ТІ = 2,05 \times 2,22 = 4,55 \text{ г.}$$

Знаходимо параметри хвилі прориву при її русі по другій розрахунковій ділянці і в третьому створі:

а) Визначаємо час добігання хвилі прориву до третього створу.

Протяжність розрахункової ділянки 20 км. (ухил dna річки  $i=0,001$ ).

На річках з середніми заплавами без великих опорів по таблиці середню швидкість руху хвилі приймаємо 8 км/ч. При цих даних час добігання хвилі прориву до третього створу.

$$t_2 = \frac{L_2}{V_2} = \frac{20}{8} = 2,5 \text{ г.}$$

б) Для визначення висоти хвилі прориву в третьому створі знаходимо значення співвідношення

$$\frac{t_2}{T_{II} + t_1} = \frac{2,5}{4,55 + 2,5} = 0,355 \quad \text{НВ III} / \text{НВ II} = 0,73$$

$$\text{НВ III} = 0,73 \cdot \text{НВ II} = 0,73 \cdot 7,7 = 5,6 \text{ м.}$$

в) Тривалість проходження хвилі прориву через третій створ знаходимо з співвідношення

$$T_{III}/T_{II} = 1,43; \quad T_{III} = 1,43 \cdot T_{II} = 1,43 \cdot 4,55 = 6,5 \text{ г.}$$

Таким чином:

1. Параметри хвилі прориву в створі зруйнованого гідровузла:  
висота хвилі прориву НВІ = 22 м;  
час повного спорожнення водосховища ТІ = 2,22 г.
2. Дані рухи хвилі прориву на першій ділянці (L1) і параметри її в другому створі:  
час добігання хвилі до другого створу  $t_1 = 2,5$  г;  
висота хвилі прориву НВІІ = 7,7 м;  
час проходження хвилі через другий створ  $T_{II} = 4,55$  г.
3. Дані рухи хвилі прориву на другій ділянці (L2) і параметри її в третьому створі:  
час добігання хвилі прориву до третього створу  $t_2 = 2,5$  г;  
висота хвилі прориву НВІІІ = 5,6 м;  
час проходження хвилі через третій створ  $T_{III} = 6,5$  г.

По даним, отриманим на основі розрахунку, будується графік проходження хвилі прориву. При цьому, доцільно масштаб висоти прориву узяти більше в порівнянні з вертикальним масштабом подовжнього профілю річки.

Використовуючи побудований графік, визначаємо:

1. Час, протягом якого можлива евакуація з населеного пункту.

Час, протягом якого можлива евакуація, характеризується часом добігання хвилі прориву. Щоб відповісти на це питання досить через точку з абсцисою 30 км. на графіці проходження хвилі провести вертикальну пряму MN. Позначивши точки перетину MN з лініями часу добігання В і часу проходження хвилі N і зносичи їх на шкалу часу, неважко знайти час приходу хвилі в створі населеного пункту К. Отже, для проведення евакуаційних заходів з населеного пункту К відводиться 2,3 години.

Можна визначити, що міст, розташований від населеного пункту в 35 км., можна використовувати протягом 3,7 години.

2. Час початку проведення рятувальних робіт в населеному пункті К

Визначаємо час початку рятувальних робіт з використанням плавзасобів, здатних пересуватися по водній перешкоді, швидкість перебігу води в якій не перевищує 1 м/с. Для цієї мети на графіці руху хвилі на лінії MN будемо трикутник BСN, який визначає зміну висоти хвилі прориву в часі в створі населеного пункту К. Сторона ВС є висота хвилі прориву.

Для того, щоб визначити час, коли в хвилі швидкість буде равна 1 м/с, використовуємо наступну залежність

$$V = V_6 \left( \frac{H_{\text{енп}}}{h_{\text{нп}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

У нашому випадку  $V_6 = 1$  м/с. Отже,  $V = 1$  м/с, якщо вираз в дужках буде рівний одиниці, а це можливо при  $H_{\text{н.п.}} = h_{\text{н.п.}}$ . По умові  $h_{\text{н.п.}} = 32$  м.

Повернемося до графіка руху хвилі і розглянемо  $\Delta BСN$ . Знайдемо точку на основі BN трикутника, де висота хвилі прориву (по масштабу) буде дорівнювати 3,2 м. Такою є точка Д. Проводячи проєкцію цієї точки на часову вісь отримаємо 5,5 години. Отже, початок рятувальних робіт з використанням плавзасобів можливо через 6,3 години після руйнування гідровузла або через 4 години після закінчення евакуації.

Визначаємо час початку рятувальних робіт з використанням наземних видів техніки. Можливість використання наземних видів техніки характеризується часом проходження хвоста хвилі прориву і умовами прохідності місцевості після затоплення. За задовільних умов прохідності місцевості, які визначаються по окремих методиках, вважатимемо, що час початку рятувальних і інших невідкладних робіт в населеному пункті К характеризується часом проходження хвоста хвилі прориву в створі н.п. К. По графіку проходження хвилі прориву цьому часу відповідає точка N. Проекція цієї точки на часову вісь відповідає 8 годинам. Отже, через 8 годин після руйнування гідровузла для проведення рятувальних і інших невідкладних робіт в н.п. К можливо використання колісної і гусеничної техніки.

Визначаємо межі можливого затоплення місцевості. Для вирішення цього завдання необхідно знати висоту хвиль в даному створі (ділянці) і поперечний розріз в цьому створі русла і заплавної частини річки. Для визначення межі можливого затоплення скористаємося побудованим раніше графіком руху хвилі прориву і схемою ділянки місцевості.

Визначення і нанесення на схему місцевості окремих точок межі затоплення проводиться таким чином. Зазвичай починають цю справу із створу зруйнованого гідровузла, а потім послідовно вони визначаються у всіх розрахункових створах. У розрахункових створах до відміток рівня води в річці додається знята з графіка руху хвилі прориву висота хвилі (НВІ, НВІІ, НВІІІ і так далі). Отримані відмітки фіксуються по горизонталях у відповідних ство-

рах на обох берегах річки. Ці точки місцевості знаходитимуться на рівні води під час проходження хвилі прориву, тобто на межі зони затоплення. Після того, як у всіх створах на обох берегах річки нанесені відмітки, вони з'єднуються пунктирною лінією, утворюючи зону затоплення. При цьому межа зони затоплення повинна перетинати горизонталі місцевості під дуже гострим кутом, а не проходити паралельно. Для точнішого визначення меж розрахункові створи доцільно вибирати якомога частіше. Після нанесення меж по масштабу визначається ширина затоплень. У нашому випадку затоплення в створі I складає 7500 м, в створі II - 8750 м і в створі III - 9000 м.

Зона надзвичайно небезпечного затоплення знаходиться в 2500 м від гідровузла (з розрахунку руху хвилі протягом 15 хвилин).

Зона небезпечного затоплення знаходиться в 10 км. від гідровузла (з розрахунку руху хвилі протягом 1 години після руйнування гідровузла).

## ОЦІНКА РУЙНУВАНЬ В ЗОНАХ ЗАТОПЛЕННЯ

Ступінь руйнування будівель і споруд під впливом гідропотоку хвилі прориву визначається величиною питомого хвильового навантаження. Будівлі і споруди зазнають - залежно від величини питомого хвильового навантаження - слабкого, середнього, сильного і повного руйнування.

Знаючи висоту хвилі і швидкість руху гребня хвилі, ступінь руйнування може бути визначена по таблиці Д.2.2.

Таблиця Д.2.2 – Ступені руйнування будівель і споруд залежно від динамічного натиску хвилі прориву

Характеристика будівель і споруд	Руйнування					
	повні і сильні		середні		слабкі	
	V	h	V	h	V	h
1	2	3	4	5	6	7
Збірні дерев'яні житлові будинки	3	2	2,5	1,5	1	1
Дерев'яні будинки (1-2 поверхи)	3,5	2	2,5	1,5	1	1
Цегляні малоповерхові будівлі (1-3 поверхи)	4	2,4	3	2	2	1
Промислові будівлі з легким металевим каркасом і безкаркасні будівлі та споруди	5	2,5	3,5	2	2	1,5
Цегляні будинки середньої поверховості (4 поверхи)	6	3	4	2,5	2,5	1,5
Промислові будівлі з важким металевим або залізобетонним каркасом (стіни з керамзитових панелей)	7,5	4	6	3	3	1,5
Бетонні і залізобетонні будівлі, будівлі антисейсмічної конструкції	12	4	9	3	4	1,5
Стінки, набережні і пірси на дерев'яних палях	4	6	2	4	1	1
Стінки, набережні і пірси напруженої конструкції із заповненням каменем	5	6	3	4	1	1

## Продовження таблиці Д.2.2

1	2	3	4	5	6	7
Стінки, набережні і пірси на залізобетонних і металевих палях	6	6	3	4	1	2
Стінки, набережні, моли, хвилеломи з кладки масивів	7	6	4	4	2	2
Устаткування портів і промислових підприємств						
Верстатне устаткування	3	2	2	2	1	1
Устаткування хімічних і електротехнічних цехів та лабораторій	4	1,5	3	1,5	1	1
Стапелі і стапельні місця суднобудівельних і судноремонтних заводів	4	4	3	3	2	1
1	2	3	4	5	6	7
Понижуючі трансформаторні підстанції	5	2	4	2	2	1
Устаткування крана: портальний кран вантажопідйомністю						
5 т	6	4	6	2	2	1,5
10 т	8	5	6	2	2	2
16 т	8	6	6	3	2	2
мостовий перевантажувач						
16 т	10	9	6	4	2	2
Мости, дороги і транспортні засоби						
Дерев'яні мости (потік вищий за проїжджу частину)	1	2	1	1,5	0	0,5
Залізобетонні мости	2	3	1	2	0	0,5
Металеві мости і шляхопроводи з прольотом 30-100 м	2	3	1	2	0	0,5
То ж з прольотом більше 100 м	2	2,5	1	2	0	0,5
Залізничні колії	2	2	1	1	0,5	0,5
Дорогі із гравію	2,5	2	1	1,5	0,5	0,5
Шосейні дороги з асфальтовим і бетонним покриттям	4	3	2	1,5	1	1
Автомобілі	2	2	1,5	1,5	1	1
Пересувний залізничний склад	3,5	3	3	1,5	1,5	1
Плавучі засоби						
Дрібні річкові судна, катери з осіданням не менше 2 м	5	2	4	1,5	2	1,5
Допоміжні судна (плавкрани, землечерпальні снаряди і т.п.)	7	2	4	1,5	2	1,5
Крупні річкові пасажирські і вантажні судна (з осіданням більше 2,5 м)	9	2	5	1,5	3	1,5
Плавдоки	8	2	5	1,5	3	1,5
Плавучі причали	9	2	6	2	3	2

## Завдання для самостійної роботи

### Задача 1.

Дано:

- глибина водосховища перед греблею  $H_g = 42$  м;
- площа дзеркала водосховища  $S_g = 1000000$  м<sup>2</sup>;
- глибина річки нижче греблі  $h_b = 3,2$  м;
- ширина водосховища перед греблею  $B = 110$  м;
- параметр, що характеризує форму русла ріки  $\mu = 0,6$ ;
- довжина 1-ї ділянки ріки  $L_1 = 25$  км;
- швидкість руху хвилі прориву на 1-й ділянці ріки  $V_1 = 10$  км/год.;
- довжина 2-ї ділянки ріки  $L_2 = 20$  км;
- швидкість руху хвилі прориву на 2-й ділянці ріки  $V_2 = 8$  км/год.

Визначити висоту хвилі прориву, час проходження хвилі прориву через створ зруйнованої греблі, час досягнення хвилею прориву 1-го створу та час досягнення хвилею прориву 2-го створу річки.

### Задача 2.

Дано:

- глибина водосховища перед греблею  $H_a = 50$  м;
- площа дзеркала водосховища  $S_a = 1200000$  м<sup>2</sup>;
- глибина річки нижче греблі  $h_b = 3,8$  м;
- ширина водосховища перед греблею  $B = 90$  м;
- параметр, що характеризує форму русла ріки  $\mu = 0,6$ ;
- довжина 1-ї ділянки ріки  $L_1 = 30$  км;
- швидкість руху хвилі прориву на 1-й ділянці ріки  $V_1 = 12$  км/год.;
- довжина 2-ї ділянки ріки  $L_2 = 15$  км;
- швидкість руху хвилі прориву на 2-й ділянці ріки  $V_2 = 10$  км/год.

Визначити висоту хвилі прориву, час проходження хвилі прориву через створ зруйнованої греблі, час досягнення хвилею прориву 1-го створу та час досягнення хвилею прориву 2-го створу річки.

### Задача 3.

Дано:

- глибина водосховища перед греблею  $H_a = 40$  м;
- площа дзеркала водосховища  $S_a = 1500000$  м<sup>2</sup>;
- глибина річки нижче греблі  $h_b = 2,9$  м;
- ширина водосховища перед греблею  $B = 120$  м;
- параметр, що характеризує форму русла ріки  $\mu = 0,6$ ;
- довжина 1-ї ділянки ріки  $L_1 = 20$  км;

- швидкість руху хвилі прориву на 1-й ділянці ріки  $V_1 = 14$  км/год.;
- довжина 2-ї ділянки ріки  $L_2 = 25$  км;
- швидкість руху хвилі прориву на 2-й ділянці ріки  $V_2 = 12$  км/год.

Визначити висоту хвилі прориву, час проходження хвилі прориву через створ зруйнованої греблі, час досягнення хвилею прориву 1-го створу та час досягнення хвилею прориву 2-го створу річки.

#### Задача 4.

Дано:

- глибина водосховища перед греблею  $H_{\hat{a}} = 48$  м;
- площа дзеркала водосховища  $S_{\hat{a}} = 2000000$  м<sup>2</sup>;
- глибина річки нижче греблі  $h_b = 3,0$  м;
- ширина водосховища перед греблею  $B = 115$  м;
- параметр, що характеризує форму русла ріки  $\mu = 0,6$ ;
- довжина 1-ї ділянки ріки  $L_1 = 15$  км;
- швидкість руху хвилі прориву на 1-й ділянці ріки  $V_1 = 15$  км/год.;
- довжина 2-ї ділянки ріки  $L_2 = 30$  км;
- швидкість руху хвилі прориву на 2-й ділянці ріки  $V_2 = 12$  км/год.

Визначити висоту хвилі прориву, час проходження хвилі прориву через створ зруйнованої греблі, час досягнення хвилею прориву 1-го створу та час досягнення хвилею прориву 2-го створу річки.

#### Задача 5.

Дано:

- глибина водосховища перед греблею  $H_{\hat{a}} = 38$  м;
- площа дзеркала водосховища  $S_{\hat{a}} = 3000000$  м<sup>2</sup>;
- глибина річки нижче греблі  $h_b = 3,5$  м;
- ширина водосховища перед греблею  $B = 105$  м;
- параметр, що характеризує форму русла ріки  $\mu = 0,6$ ;
- довжина 1-ї ділянки ріки  $L_1 = 17$  км;
- швидкість руху хвилі прориву на 1-й ділянці ріки  $V_1 = 11$  км/год.;
- довжина 2-ї ділянки ріки  $L_2 = 19$  км;
- швидкість руху хвилі прориву на 2-й ділянці ріки  $V_2 = 9$  км/год.

Визначити висоту хвилі прориву, час проходження хвилі прориву через створ зруйнованої греблі, час досягнення хвилею прориву 1-го створу та час досягнення хвилею прориву 2-го створу річки.

#### Задача 6.

Дано:

- глибина водосховища перед греблею  $H_{\hat{a}} = 45$  м;

- площа дзеркала водосховища  $S_{\hat{a}} = 3500000 \text{ м}^2$ ;
- глибина річки нижче греблі  $h_b = 2,7 \text{ м}$ ;
- ширина водосховища перед греблею  $B = 125 \text{ м}$ ;
- параметр, що характеризує форму русла ріки  $\mu = 0,6$ ;
- довжина 1-ї ділянки ріки  $L_1 = 22 \text{ км}$ ;
- швидкість руху хвилі прориву на 1-й ділянці ріки  $V_1 = 11 \text{ км/год.}$ ;
- довжина 2-ї ділянки ріки  $L_2 = 27 \text{ км}$ ;
- швидкість руху хвилі прориву на 2-й ділянці ріки  $V_2 = 10 \text{ км/год.}$

Визначити висоту хвилі прориву, час проходження хвилі прориву через створ зруйнованої греблі, час досягнення хвилею прориву 1-го створу та час досягнення хвилею прориву 2-го створу річки.

### *Задача 7.*

Дано:

- глибина водосховища перед греблею  $H_{\hat{a}} = 44 \text{ м}$ ;
- площа дзеркала водосховища  $S_{\hat{a}} = 4000000 \text{ м}^2$ ;
- глибина річки нижче греблі  $h_b = 3,1 \text{ м}$ ;
- ширина водосховища перед греблею  $B = 150 \text{ м}$ ;
- параметр, що характеризує форму русла ріки  $\mu = 0,6$ ;
- довжина 1-ї ділянки ріки  $L_1 = 12 \text{ км}$ ;
- швидкість руху хвилі прориву на 1-й ділянці ріки  $V_1 = 8 \text{ км/год.}$ ;
- довжина 2-ї ділянки ріки  $L_2 = 24 \text{ км}$ ;
- швидкість руху хвилі прориву на 2-й ділянці ріки  $V_2 = 7 \text{ км/год.}$

Визначити висоту хвилі прориву, час проходження хвилі прориву через створ зруйнованої греблі, час досягнення хвилею прориву 1-го створу та час досягнення хвилею прориву 2-го створу річки.



## ПРИКЛАДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ОБСТАНОВКИ ПРИ ВИРОБНИЧИХ АВАРІЯХ, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬСЯ ВИБУХОМ

### Приклад 1.

Вибух газоповітряної суміші у відкритому просторі.

Нехай відбудеться вибух хмари ГПС, утвореної при руйнуванні резервуару з 106 кг зрідженого пропану.

Початкові дані:  $Q = 10^6$  кг;  $k = 0,6$ ;  $m_k = 44$ ;  $C = 4,03\%$ .

Необхідно визначити тиск повітряної ударної хвилі на відстані  $r = 200$  м від центру вибуху.

Розрахунок:

$$1. r_0 = 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{Q \cdot k}{m_k \cdot C}} = 10 \cdot \sqrt[3]{\frac{10^6 \cdot 0,6}{44 \cdot 4,03}} = 150 \text{ м.}$$

$$2. \frac{r}{r_0} = \frac{200}{150} = 1,3.$$

$$3. \text{ При } \frac{r}{r_0} = 1,3 \text{ по табл. 5.7 } \Delta P_{\delta} = 350 \text{ кПа (3,5 кгс/см}^2\text{)}.$$

### Приклад 2.

Вибух газопароповітряної суміші у виробничому приміщенні.

Нехай відбудеться вибух етилено-повітряної суміші при розгерметизації технологічного блоку всередині виробничого приміщення.

Початкові дані:  $V_i = 1296 \text{ м}^3$ ;  $\rho_{\text{н} \delta \delta} = 1,285 \text{ кг/м}^3$ ;  $Q_{\text{н} \delta \delta} = 3,01 \text{ МДж/кг}$ ;  $C = 6,54\%$ .

Необхідно визначити тиск ударної хвилі на відстані 30 м від контуру приміщення при руйнуванні його огорожуючих конструкцій.

Розрахунок:

$$1. E = \frac{100 \cdot V_0 \cdot \rho_{\text{н} \delta \delta} \cdot Q_{\text{н} \delta \delta}}{C} = \frac{100 \cdot 0,8 \cdot 1296 \cdot 1,285 \cdot 3,01 \cdot 10^3}{6,54} = 61,3 \cdot 10^6 \text{ кДж.}$$

$$2. r_0 = \frac{1}{24} \cdot \sqrt[3]{E} = \frac{1}{24} \cdot \sqrt[3]{61,3 \cdot 10^6} = 16,3 \text{ м.}$$

$$3. \frac{r}{r_0} = \frac{30 + 16,3}{16,3} = 2,8.$$

$$4. \text{ При } \frac{r}{r_0} = 2,8 \text{ по табл. 5.7 } \Delta P_{\delta} = 93 \text{ кПа (0,93 кгс/см}^2\text{)}.$$

### Приклад 3.

Вибух пилоповітряної суміші у виробничому приміщенні

У цеху по переробці поліетилену при розгерметизації технологічного блоку можливе надходження пилу в приміщення.

Початкові дані:  $V_i = 4800 \text{ м}^3$ ;  $\varphi_{i \hat{e}i} = 45 \text{ г/м}^3$ ;  $Q = 47,1 \text{ МДж/кг}$ .

Необхідно визначити тиск ударної хвилі на відстані 30 м від контуру приміщення при руйнуванні його огорожуючих конструкцій.

Розрахунок:

$$1. C = 3 \cdot \varphi_{i \hat{e}i} = 3 \cdot 45 = 135 \text{ г/м}^3.$$

$$2. m = \frac{V_0 \cdot C}{1000} = \frac{0,8 \cdot 4800 \cdot 135}{1000} = 518,4 \text{ кг}.$$

$$3. E = m \cdot Q = 518,4 \cdot 47,1 \cdot 10^3 = 24,4 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

$$4. r_0 = \frac{1}{24} \cdot \sqrt[3]{E} = \frac{1}{24} \cdot \sqrt[3]{24,4 \cdot 10^6} = 12 \text{ м}.$$

$$5. \frac{r}{r_0} = \frac{30+12}{12} = 3,5.$$

$$6. \text{ При } \frac{r}{r_0} = 3,5 \text{ по табл. 5.7 } \Delta P_\delta = 65 \text{ кПа (0,65 кгс/см}^2\text{)}.$$

### Приклад 4.

Вибух при аварійній розгерметизації магістрального газопроводу

Початкові дані:

Діаметр трубопроводу  $d = 0,5 \text{ м}$ ;  $P_{\bar{a}} = 1,9 \text{ МПа}$ ;  $t = 400\text{С}$ ;  $W = 1 \text{ м/с}$ ;  $\mu = 0,8$ .

Необхідно визначити радіус зони детонації  $r_0$ .

Розрахунок:

$$1. R_0 = 8314 \cdot \sum_{i=1}^n \left( \frac{q_k}{m_k} \right)_i = 8314 \cdot \left( \frac{0,9}{16} + \frac{0,04}{30} + \frac{0,02}{44} + \frac{0,02}{58} + \frac{0,02}{72} \right) = 486 \text{ Дж/(кг} \times \text{К)}.$$

$$2. V_{\bar{a}} = R_0 \cdot \frac{T}{P_{\bar{a}}} = \frac{486 \cdot (273 + 40)}{1,9 \cdot 10^6} = 0,08 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$3. M = \Psi \cdot F \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{P_{\bar{a}}}{V_{\bar{a}}}} = 0,7 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} \cdot 0,8 \cdot \sqrt{\frac{1,9 \cdot 10^6}{0,08}} = 536 \text{ кг/с}.$$

$$4. r_0 = 12,5 \cdot \sqrt{\frac{M}{W}} = 12,5 \cdot \sqrt{\frac{536}{1}} = 289 \text{ м}.$$

### *Завдання для самостійної роботи*

*Задача 1.* Відбувся вибух хмари газоповітряної суміші, що утворилася при руйнуванні резервуару з  $2 \cdot 10^6$  кг скрапленого метану.

Визначити тиск ударної хвилі на відстані  $r=300$  м від центру вибуху.

*Задача 2.* Відбувся вибух хмари газоповітряної суміші, що утворилася при руйнуванні резервуару з  $0,5 \cdot 10^6$  кг пропілену.

Визначити тиск ударної хвилі на відстані  $r=350$  м від центру вибуху.

*Задача 3.* Відбувся вибух бензоло-повітряної суміші при розгерметизації технологічного блоку всередині виробничого приміщення (об'єм приміщення -  $1310 \text{ м}^3$ ).

Визначити тиск ударної хвилі на відстані 20 м від контуру приміщення при руйнуванні огорожуючих конструкцій.

*Задача 4.* Відбувся вибух метаноло-повітряної суміші при розгерметизації технологічного блоку всередині виробничого приміщення (об'єм приміщення -  $1200 \text{ м}^3$ ).

Визначити тиск ударної хвилі на відстані 25 м від контуру приміщення при руйнуванні огорожуючих конструкцій.

*Задача 5.* В цеху з переробки полістиролу при розгерметизації технологічного блоку можливе надходження пилу у приміщення (об'єм приміщення -  $4900 \text{ м}^3$ ).

Визначити тиск ударної хвилі на відстані 20 м від контуру приміщення при руйнуванні огорожуючих конструкцій.

*Задача 6.* В цеху з переробки метилцелюлози при розгерметизації технологічного блоку можливе надходження пилу у приміщення (об'єм приміщення -  $4700 \text{ м}^3$ ).

Визначити тиск ударної хвилі на відстані 25 м від контуру приміщення при руйнуванні огорожуючих конструкцій.

*Задача 7.* Визначити значення радіусу зони детонації при аварійній розгерметизації магістрального газопроводу. Вихідні дані:

- діаметр газопроводу – 0,7 м;
- температура транспортуємого газу - 400С;
- тиск – 2,5 МПа;
- швидкість вітру – 2 м/с.

Склад газу: метан - 90 %; етан - 4 %; пропан - 2 %; бутан - 2 %; ізопентан - 2 %.

*Задача 8.* Визначити значення радіусу зони детонації при аварійній розгерметизації магістрального газопроводу. Вихідні дані:

- діаметр газопроводу – 0,8 м;
- температура транспортує мого газу - 450С;
- тиск – 2,0 МПа;
- швидкість вітру – 1,5 м/с.

Склад газу: метан - 90 %; етан - 4 %; пропан - 2 %; бутан - 2 %; ізопентан - 2 %.

## ПРОГНОЗУВАННЯ ОБ'ЄМІВ І ТЕРМІНІВ ВИКОНАННЯ ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ЩОДО КОНСЕРВАЦІЇ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНИХ ДІЛЯНОК ЛІСУ ПРИ АВАРІЇ НА АЕС

Аналіз радіаційної обстановки при аварії на ЧАЕС показав, що на ділянках лісу, які опинилися на шляху руху радіоактивної хмари, рівні радіоактивного забруднення в 1,5-2 рази більші, ніж на відкритій місцевості, і змінюються від 50 мр/год. до 1600 мр/год. Основною причиною цього є затримуюча здатність листя і особливо хвої, що мають велику поверхню зіткнення з радіоактивною хмарою.

Дія радіоактивних частинок стронцію-90 і цезію-137 на листя і хвою дерев викликає відмирання хвої і листя, а крони дерев стають джерелами вторинного забруднення при сильному вітрі або виникненні загорянь.

Відомі наступні основні способи консервації радіоактивно забруднених ділянок лісу:

1. Гідронамив ґрунту з «засипкою» спиляного лісу.
2. Спалювання в спеціальних печах деревини з тонким очищенням димового аерозолю.
3. Штучне (швидке) гниття деревини.
4. Засипка спиляних стовбурів і віток сухим ґрунтом.

Дослідження і досвід консервації «рудого лісу» в зоні аварії на ЧАЕС показав, що найбільш раціональною є засипка спиляних дерев, віток і підстилки сухим ґрунтом. При цьому виконувалися наступні групи заходів або види робіт:

1. Радіаційна розвідка і первинна підсипка сухого і чистого піску між деревами шаром 0,3-0,5 м з метою зниження рівня радіоактивного фону в 5-7 разів і забезпечення безпеки роботи людей.
2. Спилування дерев, очищення суччя і ущільнення завалу гусеницями ІМР і бульдозера.
3. Засипка ущільненого «завалу» шаром ґрунту завтовшки 0,5-0,7 м.
4. Підсипка на поверхні утвореного насипу рослинного ґрунту, посів трави або посадка чагарників.

Після виконання цих заходів рівень забруднення на поверхні утвореного насипу знижується більш ніж в 100 разів (1 метр ґрунту – 7 шарів половинного ослаблення, а  $2^7=128$  разів).

Перед початком робіт по консервації радіоактивно забруднених ділянок лісу проводиться обвалування їх насипом заввишки 1-1,5 м з метою запобігання змиву радіоактивних частинок з дощовими і талими водами. Насип зводиться шляхом зрізання ґрунту з боку доріг, вільних ділянок і переміщення його у бік лісу. Для цього використовуються БАТ-М або ІМР із захищеними кабінами ( $K_3 = 80-100$ ). Продуктивність БАТ та ІМР при обвалуванні ділянок лісового масиву складає 100-120 м<sup>3</sup>/год.

Крім того, ділянка лісу розділяється протипожежними смугами шириною 3-5 м, очищеними від лісової підстилки і чагарнику до мінералізованого

грунту. Постійно проводиться радіаційна розвідка (не менше 2 разів на добу). Відстань між протипожежними смугами приймається рівною 50-100 м. Розчищення смуг проводиться з використанням ІМР і БАТ із захищеними кабінами з  $K_3 = 80-100$ . Продуктивність ІМР і БАТ при розчищенні протипожежних смуг складає від 200 до 400 м/год.

Площа лісу, що підлягає консервації, розділяється на робочі ділянки наступних розмірів: ширина – 20 м, глибина – 50 м, площа – 1000 м<sup>2</sup>. На кожній такій ділянці розчищаються 2-3 тимчасових проїзди для проходу самоскидів з ґрунтом між крупними деревами. Ці підготовчі роботи виконуються ІМР і бульдозерами.

Первинна підсипка чистого ґрунту проводиться самоскидами, а розрівнювання ґрунту між деревами – бульдозером із захищеною кабіною, що має ступінь ослаблення випромінювань не менше ніж в 8–10 разів. Об'єм первинної підсипки ґрунту ( $V_{zp.n}$ ) на кожній робочій ділянці (1000 м<sup>2</sup>) при товщині підсипки 0,3-0,4 м буде складати 300-400 м<sup>3</sup>.

Кількість самоскидів ( $N_c$ ), необхідних для виконання первинної підсипки ґрунту на робочій ділянці, може бути визначеною по формулі:

$$N_c = \frac{V_{zp.n}}{n_p E_c K_6}, \text{ машино-годин,}$$

де  $V_{zp.n}$  – об'єм первинної засипки на робочій ділянці;  $E_c$  – ємність ґрунту, що перевозиться в самоскиді, м<sup>3</sup> (від 2 до 3 м<sup>3</sup>);  $n_p$  – число рейсів самоскида в годину. При дальності перевезення 5-7 км. і вантаження одним екскаватором  $n_p$  може прийматися 2-4 рейси в годину;  $K_6$  – коефіцієнт використання робочого часу автомобіля,  $K_6 = 0,5$ .

Розрівнювання відсипаного самоскидами ґрунту між деревами проводиться бульдозером.

#### Задача 1.

Визначити необхідну кількість самоскидів ( $N_c$ ) з ємністю кузова 2-4 м<sup>3</sup> ( $E_c = 3 \text{ м}^3$ ) і кількістю рейсів в годину  $n_p = 3$  ( $K_6 = 0,5$ ) для первинної засипки робочої ділянки.  $V_{zp.n} = 300-400 \text{ м}^3$ . Час безперервної роботи в зміну – 4 години.

#### Рішення.

По формулі 5.49:

- при  $V_{zp.n} = 300 \text{ м}^3$   $N_c = \frac{300}{3 \cdot 3 \cdot 0,5} \approx 67$  машино-годин;

- при  $V_{zp.n} = 400 \text{ м}^3$   $N_c = \frac{400}{3 \cdot 3 \cdot 0,5} \approx 88$  машино-годин.

Під час безперервної роботи особового складу протягом 4 годин, для виконання робіт по первинній підсипці ґрунту на ділянці 1000 м<sup>2</sup> буде потрібно не менше 17–22 самоскидів.

Спилювання *крупних і середніх дерев, очищення суччя і ущільнення «завалу»* проводиться з використанням мотопилок. Об'єм деревини, що підлягає спилюванню і очищенню від суччя ( $V_{сп.л}$ ), залежить від густини лісового масиву, діаметру і довжини дерев:

$$V_{сп.л} = K_{кр}V_{1к} + K_{сер}V_{1сер}, \text{ м}^3/\text{га},$$

де  $K_{кр}$  і  $K_{сер}$  – кількість крупних і середніх дерев на 1 га лісу. Дані показники залежать від ступеня густини лісового масиву і можуть прийматися по таблиці Д.2.3;  $V_{1к}$  і  $V_{1сер}$  – об'єм одного крупного і середнього дерева в м<sup>3</sup>. Може прийматися по таблиці Д.2.3.

Таблиця Д.2.3 – Характеристики лісу

№ з/п	Кількість дерев на 1 га лісу			Характеристика дерев	Діаметр, см	Середня висота дерев, м	Об'єм одного дерева, м <sup>3</sup>
	густого	середнього	рідкого				
1	320	200	130	великі	>32	20	1,6
2	520	340	300	середні	24-31	15	0,9
3	122	750	450	дрібні	12-23	5-15	0,75

*Задача 2.*

Визначити об'єм крупних і середніх дерев, що спилюються, на 1000 м<sup>2</sup> лісового масиву середньої густини.

Рішення.

По таблиці Д.2.3 для середньої густини лісу:

$$K_{кр}=200 \text{ дер./га}; K_{сер}=340 \text{ дер./га}; V_{1к}=1,6 \text{ м}^3; V_{1сер}=0,9 \text{ м}^3.$$

$$V_{сп.л} = 200 \cdot 1,6 + 340 \cdot 0,9 = 626 \text{ м}^3/\text{га}.$$

Робоча ділянка, яка дорівнює 1000 м<sup>2</sup>, складає 0,1 га. Тоді об'єм лісу, що спилюється на робочій ділянці, буде складати 626 · 0,1 = 62,6 м<sup>3</sup>.

Час, необхідний для спилювання лісу, очищення суччя і ущільнення «завалу» залежить від продуктивності пил, їх кількості і ефективності використання. Даний час може бути визначений по формулі:

$$T_{сп.л} = \frac{V_{сп.л}}{P_n K_v}, \text{ год.},$$

де  $V_{сн.л}$  – об'єм крупних і середніх дерев на 1 га лісу,  $m^3$ ;  $П_n$  – продуктивність пили (може прийматися 4–7,2  $m^3/год.$ );  $K_e$  – коефіцієнт використання пили ( $K_e=0,5$ ).

### Задача 3.

Визначити витрати часу на спилювання крупних і середніх дерев на площі 1 га лісу середньої густини. Продуктивність пили - 7,2  $m^3/год.$  Об'єм лісу, що спилюється, дорівнює 626  $m^3/га$  (задача 2).

### Рішення:

$$T_{сн.л} = \frac{626}{7,2 \cdot 0,5} = 174 \text{ години роботи пили.}$$

Для робочої ділянки площею 1000  $m^2$  (0,1 га) час спилювання однією пилою складе  $174 \times 0,1 = 17,4$  машино-годин. При використанні 3 пил час спилювання крупних і середніх дерев складе близько 6 годин, або двох змін, тривалістю 3 години кожна.

Засипка ущільненого «завалу» із спиляних дерев і віток чистим ґрунтом і підсипка рослинного шару здійснюватиметься за розглянутою раніше технологією первинної підстилки лісового масиву. Враховуючи, що об'єм ґрунту для засипання ущільненого лісового «завалу» приблизно в 2 рази більше, ніж при первинній підсипці, необхідна кількість машино-змін роботи самоскидів зросте також в 2 рази.

Необхідно відзначити, що при виконанні вищезазначених робіт особовий склад повинен мати каски з наплічниками, рукавиці, респіратори і захисні пелюстки, а також захисну споруду для короточасного перебування вільного особового складу. На ЧАЕС для цього використовувався бронетранспортер-розвідник.

Досвід виконання інженерно-технічних заходів по консервації близько 20 га «Рудого лісу» при аварії на ЧАЕС показав, що чітка організація роботи комплексу сил і засобів дозволила провести консерваційні роботи за розглянутою вище технологією протягом 2,5 місяців. Результати радіаційної розвідки рівнів забруднення на поверхні законсервованого лісового масиву «Рудий ліс» показали, що рівень забруднення, який перевищував у ряді місць 1000  $мр/год.$ , знизився до 10-20  $мр/год.$  і став близький до фону навколишньої місцевості (15-20  $мр/год.$ ).

Розрахунки ефективності заходів щодо підсипки ґрунту завтовшки 0,7-1,0 м над рівнем лісового завалу показали, що рівень радіації на поверхні ґрунту знижується більш ніж в 100 разів.



Таблиця Д3.1 – Значення глибини поширення первинної хмари для деяких НХР  $G_{T_1}$  (км)

Маса НХР (т)	Інверсія, швидкість вітру (м/с)				Конвекція, швидкість вітру (м/с)				Ізотермія, швидкість вітру (м/с)				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Аміак													
1	0,32	0,21	0,16	0,13	0,12	0,09	0,07	0,06	0,21	0,14	0,11	0,09	0,06
10	1,44	0,92	0,71	0,59	0,39	0,27	0,22	0,19	0,77	0,52	0,41	0,35	0,21
30	2,93	1,87	1,44	1,19	0,67	0,47	0,39	0,34	1,43	0,96	0,77	0,65	0,39
50	4,08	2,60	2,00	1,66	0,87	0,61	0,50	0,43	1,92	1,29	1,02	0,87	0,52
100	6,40	4,08	3,14	2,60	1,23	0,87	0,71	0,61	2,84	1,92	1,52	1,29	0,77
150	8,33	5,31	4,08	3,39	1,50	1,06	0,87	0,75	3,58	2,41	1,92	1,63	0,96
300	13,05	8,33	6,40	5,31	2,13	1,50	1,23	1,06	5,32	3,58	2,84	2,41	1,43
500	18,17	11,59	8,91	7,40	2,75	1,94	1,59	1,37	7,12	4,79	3,80	3,23	1,92
1000	28,49	18,17	13,97	11,59	3,89	2,75	2,24	1,94	10,56	7,12	5,65	4,79	2,84
10000	126,81	80,90	62,20	51,61	12,34	8,72	7,12	6,16	39,25	26,44	20,98	17,81	10,56
Бромоводень													
1	0,80	0,51	0,39	0,32	0,25	0,17	0,14	0,12	0,46	0,31	0,24	0,21	0,12
10	3,55	2,26	1,74	1,44	0,78	0,55	0,45	0,39	1,69	1,14	0,91	0,77	0,46
Бромоетан													
1	0,26	0,17	0,13	0,11	0,10	0,07	0,06	0,05	0,17	0,12	0,09	0,08	0,05
10	1,17	0,75	0,57	0,48	0,33	0,23	0,19	0,17	0,64	0,43	0,34	0,29	0,17
30	2,39	1,52	1,17	0,97	0,57	0,40	0,33	0,29	1,19	0,80	0,64	0,54	0,32
50	3,32	2,12	1,63	1,35	0,74	0,52	0,43	0,37	1,60	1,08	0,85	0,73	0,43
100	5,21	3,32	2,56	2,12	1,05	0,74	0,60	0,52	2,37	1,60	1,27	1,08	0,64
150	6,78	4,32	3,32	2,76	1,28	0,91	0,74	0,64	2,99	2,01	1,60	1,36	0,80
300	10,62	6,78	5,21	4,32	1,82	1,28	1,05	0,91	4,44	2,99	2,37	2,01	1,19
500	14,80	9,44	7,26	6,02	2,35	1,66	1,35	1,17	5,94	4,00	3,18	2,70	1,60
Диметиламін													
1	0,53	0,34	0,26	0,21	0,18	0,13	0,10	0,09	0,32	0,21	0,17	0,14	0,09
10	2,35	1,50	1,15	0,96	0,57	0,40	0,33	0,28	1,18	0,79	0,63	0,53	0,32
30	4,79	3,05	2,35	1,95	0,98	0,69	0,57	0,49	2,20	1,48	1,18	1,00	0,59
50	6,67	4,25	3,27	2,71	1,27	0,90	0,73	0,63	2,95	1,99	1,58	1,34	0,79
100	10,45	6,67	5,13	4,25	1,79	1,27	1,03	0,90	4,38	2,95	2,34	1,99	1,18
150	13,60	8,67	6,67	5,53	2,20	1,55	1,27	1,10	5,51	3,71	2,95	2,50	1,48
200	16,39	10,45	8,04	6,67	2,54	1,79	1,46	1,27	6,50	4,38	3,47	2,95	1,75
Метантиол (метил меркаптан)													
1	0,32	0,20	0,15	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,20	0,14	0,11	0,09	0,05
10	1,41	0,90	0,69	0,57	0,38	0,27	0,22	0,19	0,75	0,51	0,40	0,34	0,20
30	2,87	1,83	1,41	1,17	0,66	0,47	0,38	0,33	1,40	0,95	0,75	0,64	0,38
50	3,99	2,55	1,96	1,62	0,85	0,60	0,49	0,43	1,88	1,26	1,00	0,85	0,51
100	6,26	3,99	3,07	2,55	1,21	0,85	0,70	0,60	2,79	1,88	1,49	1,26	0,75
150	8,14	5,19	3,99	3,31	1,48	1,04	0,85	0,74	3,51	2,37	1,88	1,59	0,95
200	12,76	8,14	6,26	3,99	2,09	1,48	1,21	0,85	4,14	2,79	2,21	1,88	1,11
300	17,77	11,34	8,72	5,19	2,70	1,91	1,56	1,04	5,21	3,51	2,79	2,37	1,40

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Миш'яковистий водень													
10	13,26	8,46	6,50	1,21	2,16	1,52	1,24	0,34	1,45	0,98	0,78	0,66	0,39
30	27,03	17,25	13,26	5,40	3,74	2,64	2,16	1,08	5,39	3,63	2,88	2,45	1,45
50	37,65	24,02	18,47	11,00	4,83	3,41	2,78	1,87	10,09	6,80	5,39	4,58	2,72
100	59,02	37,65	28,95	15,32	6,83	4,83	3,94	2,41	13,50	9,09	7,22	6,12	3,63
150	76,77	48,98	37,65	24,02	8,37	5,92	4,83	3,41	20,04	13,50	10,71	9,09	5,39
300	120,34	76,77	59,02	31,24	11,85	8,37	6,83	4,18	25,25	17,01	13,50	11,46	6,80
500	167,60	106,92	82,20	48,98	15,30	10,81	8,83	5,92	37,48	25,25	20,04	17,01	10,09
1000	262,71	167,60	128,85	68,21	21,66	15,30	12,49	7,64	50,15	33,78	26,81	22,76	13,50
2000	411,81	262,71	201,97	106,92	30,65	21,66	17,68	10,81	74,45	50,15	39,80	33,78	20,04
Монооксид вуглецю													
1	0,36	0,23	0,18	0,15	0,13	0,09	0,08	0,07	0,23	0,15	0,12	0,10	0,06
50	4,59	2,93	2,25	1,87	0,95	0,67	0,55	0,47	2,12	1,43	1,13	0,96	0,57
100	7,19	4,59	3,53	2,93	1,34	0,95	0,77	0,67	3,15	2,12	1,68	1,43	0,85
Оксид етилену													
1	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-	-
10	0,07	0,05	0,04	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	-	-	-	-	-
30	0,15	0,09	0,07	0,06	0,07	0,05	0,04	0,03	-	-	-	-	-
50	0,20	0,13	0,10	0,08	0,09	0,06	0,05	0,04	-	-	-	-	-
100	0,32	0,20	0,16	0,13	0,12	0,09	0,07	0,06	-	-	-	-	-
150	0,42	0,27	0,20	0,17	0,15	0,11	0,09	0,07	-	-	-	-	-
200	0,50	0,32	0,25	0,20	0,17	0,12	0,10	0,09	-	-	-	-	-
Сірководень													
1	0,33	0,21	0,16	0,14	0,12	0,09	0,07	0,06	0,21	0,14	0,11	0,10	0,06
10	1,48	0,94	0,73	0,60	0,40	0,28	0,23	0,20	0,78	0,53	0,42	0,36	0,21
30	3,02	1,92	1,48	1,23	0,69	0,49	0,40	0,34	1,47	0,99	0,78	0,67	0,40
50	4,20	2,68	2,06	1,71	0,89	0,63	0,51	0,44	1,96	1,32	1,05	0,89	0,53
100	6,59	4,20	3,23	2,68	1,26	0,89	0,72	0,63	2,92	1,96	1,56	1,32	0,78
150	8,57	5,47	4,20	3,49	1,54	1,09	0,89	0,77	3,67	2,48	1,96	1,67	0,99
200	10,33	6,59	5,06	4,20	1,78	1,26	1,02	0,89	4,33	2,92	2,31	1,96	1,17
Сірчистий ангідрид (діоксин сірки)													
1	0,36	0,23	0,18	0,15	0,13	0,09	0,08	0,07	0,23	0,15	0,12	0,45	0,06
10	1,62	1,04	0,80	0,66	0,43	0,30	0,25	0,21	0,85	0,57	0,46	1,54	0,23
30	3,31	2,11	1,62	1,35	0,74	0,52	0,43	0,37	1,59	1,07	0,85	2,77	0,43
50	4,61	2,94	2,26	1,88	0,95	0,67	0,55	0,48	2,13	1,44	1,14	3,64	0,57
100	7,22	4,61	3,54	2,94	1,35	0,95	0,78	0,67	3,16	2,13	1,69	5,28	0,85
150	9,40	6,00	4,61	3,82	1,65	1,17	0,95	0,83	3,99	2,68	2,13	6,55	1,07
200	11,33	7,22	5,55	4,61	1,91	1,35	1,10	0,95	4,70	3,16	2,51	7,64	1,26
Соляна кислота (хлористий водень)													
1	1,43	0,91	0,70	0,58	0,39	0,27	0,22	0,19	0,76	0,51	0,41	0,35	0,20
10	6,36	4,06	3,12	2,59	1,22	0,86	0,70	0,61	2,83	1,90	1,51	1,28	0,76
Формальдегід (формалін)													
1	2,11	1,35	1,04	0,86	0,52	0,37	0,30	0,26	1,07	0,72	0,57	0,49	0,29
10	9,41	6,01	4,62	3,83	1,65	1,17	0,95	0,83	3,99	2,69	2,13	1,81	1,07
30	19,19	12,24	9,41	7,81	2,87	2,03	1,65	1,43	7,47	5,03	3,99	3,39	2,01
50	26,73	17,05	13,11	10,88	3,71	2,62	2,14	1,85	9,99	6,73	5,34	4,53	2,69
100	41,90	26,73	20,55	17,05	5,24	3,71	3,02	2,62	14,83	9,99	7,93	6,73	3,99
150	54,50	34,77	26,73	22,18	6,43	4,54	3,71	3,21	18,68	12,59	9,99	8,48	5,03
200	65,68	41,90	32,21	26,73	7,42	5,24	4,28	3,71	22,01	14,83	11,77	9,99	5,92

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Фосген													
1	0,85	0,54	0,42	0,35	0,26	0,18	0,15	0,13	0,38	0,33	0,26	0,22	0,13
10	3,80	2,42	1,86	1,55	0,82	0,58	0,47	0,41	1,41	1,21	0,96	0,82	0,48
30	7,74	4,94	3,80	3,15	1,42	1,01	0,82	0,71	2,65	2,26	1,80	1,53	0,90
50	10,79	6,88	5,29	4,39	1,84	1,30	1,06	0,92	3,54	3,03	2,40	2,04	1,21
100	16,91	10,79	8,29	6,88	2,60	1,84	1,50	1,30	5,25	4,50	3,57	3,03	1,80
Фтор													
10	22,55	14,39	11,06	9,18	3,25	2,30	1,87	1,62	8,60	5,79	4,60	3,90	3,44
400	246,67	157,36	120,98	100,39	20,63	14,58	11,90	10,30	70,44	47,45	37,66	31,96	28,14
1000	446,86	285,08	219,16	181,86	32,65	23,07	18,83	16,30	118,75	79,99	63,48	53,88	47,45
1500	581,26	370,81	285,08	236,56	40,00	28,27	23,07	19,97	149,62	100,79	79,99	67,89	59,78
2000	700,47	446,86	343,54	285,08	46,20	32,65	26,65	23,07	176,28	118,75	94,24	79,99	70,44
2500	809,53	516,44	397,03	329,46	51,67	36,51	29,80	25,80	200,19	134,85	107,03	90,84	79,99
3000	911,13	581,26	446,86	370,81	56,61	40,00	32,65	28,27	222,12	149,62	118,75	100,79	88,75
Фтороводень													
1	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
10	0,05	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01
30	0,11	0,07	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,08	0,05	0,04	0,04	0,02
50	0,15	0,10	0,08	0,06	0,07	0,05	0,04	0,03	0,11	0,07	0,06	0,05	0,03
100	0,24	0,15	0,12	0,10	0,10	0,07	0,06	0,05	0,16	0,11	0,09	0,07	0,04
150	0,32	0,20	0,15	0,13	0,12	0,08	0,07	0,06	0,20	0,14	0,11	0,09	0,05
200	0,38	0,24	0,19	0,15	0,14	0,10	0,08	0,07	0,24	0,16	0,13	0,11	0,06
Хлор													
1	1,41	0,98	0,75	0,63	0,41	0,29	0,24	0,20	0,81	0,55	0,43	0,37	0,22
10	6,29	4,36	3,35	2,78	1,29	0,91	0,75	0,65	3,01	2,03	1,61	1,37	0,81
30	12,83	8,90	6,84	5,68	2,24	1,58	1,29	1,12	5,64	3,80	3,01	2,56	1,52
50	17,87	12,39	9,53	7,90	2,90	2,05	1,67	1,45	7,54	5,08	4,03	3,42	2,03
100	28,00	19,42	14,93	12,39	4,10	2,90	2,36	2,05	11,20	7,54	5,99	5,08	3,01
150	36,43	25,26	19,42	16,12	5,02	3,55	2,90	2,51	14,11	9,51	7,54	6,40	3,80
300	57,10	39,60	30,45	25,26	7,11	5,02	4,10	3,55	20,95	14,11	11,20	9,51	5,64
500	79,52	55,16	42,40	35,19	9,18	6,48	5,29	4,58	28,03	18,88	14,98	12,72	7,54
1000	124,65	86,46	66,47	55,16	12,99	9,18	7,49	6,48	41,61	28,03	22,24	18,88	11,20
2000	195,40	135,53	104,19	86,46	18,38	12,99	10,60	9,18	61,77	41,61	33,02	28,03	16,63
Хлорціан													
10	3,43	2,19	1,68	1,40	0,76	0,54	0,44	0,38	1,64	1,11	0,88	0,75	0,44
30	7,00	4,46	3,43	2,85	1,32	0,93	0,76	0,66	3,07	2,07	1,64	1,40	0,83
50	9,74	6,22	4,78	3,97	1,70	1,20	0,98	0,85	4,11	2,77	2,20	1,87	1,11
100	15,27	9,74	7,49	6,22	2,40	1,70	1,39	1,20	6,11	4,11	3,27	2,77	1,64
150	19,87	12,67	9,74	8,09	2,95	2,08	1,70	1,47	7,70	5,18	4,11	3,49	2,07
300	31,14	19,87	15,27	12,67	4,17	2,95	2,40	2,08	11,42	7,70	6,11	5,18	3,07
500	43,37	27,67	21,27	17,65	5,39	3,81	3,11	2,69	15,29	10,30	8,17	6,94	4,11
1000	67,99	43,37	33,35	27,67	7,62	5,39	4,40	3,81	22,69	15,29	12,13	10,30	6,11
2000	106,57	67,99	52,27	43,37	10,79	7,62	6,22	5,39	33,69	22,69	18,01	15,29	9,07
3000	138,63	88,44	67,99	56,42	13,22	9,34	7,62	6,60	42,44	28,59	22,69	19,26	11,42

Примітки:

1. Глибина поширення хмари розрахована за умови, що інверсія збережеться протягом усього часу розповсюдження НХР.

2. У разі руйнування резервуарів з сірковуглецем, хлорпикрином небезпека ураження зазвичай у районі аварії.

Таблиця Д3.2 – Значення поправного коефіцієнта  $K_{t_1}$  що враховує вплив температури повітря на глибину поширення первинної хмари НХР

Назва НХР	Температура повітря, оС					
	-20	-10	0	+10	+20	+30
Аміак (ізотермічний)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2
Аміак (під тиском)	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,4
Бромоводень	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
Бромометан	0	0	0	0,5	1,0	2,3
Диметиламін	0	0	0	0,4	1,0	2,5
Метантіол (метил меркаптан)	0	0	0	0,5	1,0	2,4
Миш'яковистий водень	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
Монооксид вуглецю	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Оксид етилену	0	0	0	0	1,0	3,2
Сірководень	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
Соляна кислота (хлористий водень)	0,6	0,8	0,8	0,9	1,0	1,2
Сірчистий ангідрид (діоксин сірки)	0	0	0,6	0,8	1,0	1,7
Формальдегід (формалін)	0	0	0,5	0,8	1,0	1,5
Фосген	0	0	0	0,3	1,0	1,4
Фтор	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1
Фтороводень	0	0	0	0	1,0	1,0
Хлор (ізотермічний)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,4
Хлор (під тиском)	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0	1,4
Хлорціан	0	0	0	0	1,0	3,9

Таблиця Д3.3 – Ступені вертикальної стійкості повітря в приземному шарі

Швидкість вітру, м/с	ДЕНЬ			НІЧ		
	ясно	мінлива хмарність	хмарно	ясно	мінлива хмарність	хмарно
0,5	КОНВЕКЦІЯ			ІНВЕРСІЯ		
0,6–2,0						
2,1–4,0						
більше 4,0	ІЗОТЕРМІЯ			ІЗОТЕРМІЯ		

Таблиця Д3.4 – Значення коефіцієнта пропорційності  $K_K$  залежно від ступеня вертикальної стійкості повітря в приземному шарі

Вертикальна стійкість повітря	Величина відношення $Q_3/Q_T$								
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2	4	6	8
Конвекція	0,5	0,6	0,8	0,9	1,0	1,4	1,9	2,4	2,7
Ізотермія	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0	1,5	2,2	2,8	3,3
Інверсія	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,6	2,6	3,4	4,0

Таблиця Д3.5 – Значення коефіцієнта впливу місцевості  $K_M$ 

Значення комплексного показника $K_P$	Стан атмосфери в приземному шарі повітря		
	конвекція	ізотермія	інверсія
0,05	1,0	1,0	1,0
0,1	0,8	0,8	0,9
0,2	0,5	0,6	0,6
0,3	0,4	0,5	0,5
0,4	0,3	0,4	0,5
0,5	0,3	0,4	0,4
0,6	0,3	0,3	0,4
0,7	0,2	0,3	0,4
0,8	0,2	0,3	0,4
0,9	0,2	0,2	0,3
1,0	0,1	0,2	0,3
1,1	0,1	0,2	0,2
1,2	0,1	0,1	0,1
1,3	0,1	0,1	0,1
1,4	0,05	0,05	0,05
1,5	0,05	0,05	0,05
1,6	0,05	0,05	0,05

Таблиця Д3.6 – Значення комплексного показника  $K_P$ 

Вид рослинності	Тип лісу	Вид рельєфу					
		рівнинний	рівнинно-хвилястий	рівнинно-горбистий	горбисто-балочний	горбистий	передгір'я
Літо							
Лісиста	хвойні	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6
	змішані	0,6	0,8	0,9	0,9	1	1,2
Лісисто-стєпова	хвойні	0,6	0,8	1	1,1	1,2	1,5
	листяні	0,4	0,6	0,8	0,9	0,9	1,1
Стєпова		0,3	0,4	0,7	0,8	0,8	1
Напівпустинна		0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
Зима							
Лісиста	хвойні	0,9	1,1	1,2	1,3	1,4	1,6
	змішані	0,4	0,6	0,7	1	0,9	1,1
Лісисто-стєпова	хвойні	0,5	0,7	0,8	0,9	1	1,3
	листяні	0,2	0,3	0,5	0,6	0,7	1
Стєпова		0,1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,9
Напівпустинна		0,05	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8

Таблиця ДЗ.7 – Фізико-хімічні властивості деяких НХР

№ з/п	Назва НХР	Молекулярна маса $M$ (г/моль)	Густина $\rho$ (кг/м <sup>3</sup> )		Температура кипіння $t_k/T_k$ , (оС/К)	Питома теплота випаровування $\lambda$ , (кДж/кг)	Питома теплоємність рідини $C_v$ (кДж/кг × оС)	Порогова токсодоза $PC50$ (г×с/м <sup>3</sup> )
			газ	рідина				
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Акрилонітрил	53,06	2,24	813	77,3/350,3	575	2,03	45
2	Акролеїн	56,07	2,37	839	52,7/325,7	542,2	2,15	12
3	Аміак: зберігання під тиском	17,03	0,8	682	33,4/239,6	1190,7	4,78	454
	зберігання в ізотермічних ємкостях		-	682				
4	Ацетонітрил	41,05	-	786	82,0/355,0	724,7	-	1296
5	Ацетонціангідрін	85,11	-	932	120,0/393,0	558,1	-	114
6	Бензол	78,0	3,5	883	80,0/353,0	396	1,8	3600
7	Бромоводень	80,9	3,5	1490	67,8/205,2	217	0,74	144
8	Бромометан	94,94	-	1732	4,0/276,6	253	0,428	72
9	Диметиламін	45,0	1,95	661	7,0/280,0	591	3,0	60
10	Етиленімін	43,01	-	832	57,0/330,0	389,2	-	288
11	Етиленсульфід	60,12	-	1005	55,0/328,0	-	-	6
12	Етилмеркаптан (етантиол)	62,13	-	839	35,0/308,0	431	-	132
13	Метантиол (метилмеркаптан)	48,1	-	867	6,0/279,0	511,12	1,85	102
14	Метиламін	31,06	1,4	699	-6,3/266,9	824,2	-	72
15	Метилакрилат	86,09	-	953	80,2/353,2	384,5	2,01	360
16	Миш'яковистий водень	77,94	3,5	1640	62,5/210,5	214	0,494	12
17	Монооксид вуглецю	28,01	0,968	1000	191,5/81,5	216,5	2,19	1620
18	Оксид азоту	46,01	-	1490	21,0/294,0	272	0,817	90
19	Оксид етилену	44,05	1,7	887	10,7/283,7	554,2	1,096	3600
20	Оксихлорид фосфору	153,33	-	1645	105,8/378,8	100	1,0	3,6
21	Сірководень	34,1	1,5	964	60,4/212,6	310	2,01	966
22	Сірковуглець	76,14	6,0	1263	46,2/319,2	377,8	0,991	2592
23	Сірчистий ангідрид (діоксин сірки)	64,07	2,9	1462	10,1/262,9	361,3	1,45	194

1	2	3	4	5	6	7	8	9
24	Синильна кислота (ціаністий водень)	27,0	0,9	689	25,6/298,6	933	2,62	12
25	Соляна кислота (хлористий водень)	36,5	1,64	1191	- 85,1/187,9	300	1,75	120
26	Триметиламін	59,11	-	671	2,9/275,9	388	-	360
27	Трихлорид фосфору	137,33	-	1574	76,0/349,0	100	1,0	180
28	Формальдегід (формалін)	30,0	1,03	815	- 19,3/253,7	273	2,34	36
29	Фосген	98,9	3,48	1420	8,2/281,2	158	1,02	33
30	Фтороводень	20,01	0,92	980	19,5/292,5	1560	2,49	240
31	Фтор	38,0	1,7	1512	- 188,0/85,0	727	1,51	12
32	Хлор	70,91	3,2	1557	- 34,6/238,5	288,5	0,876	36
33	Хлорпикрін	164,38	-	1658	112,3/385, 3	359	1,36	1,2
34	Хлорціан	61,5	2,52	1258	12,6/285,6	208	1,49	45
35	Хлорометан	50,49	2,3	983	- 24,2/248,8	424	1,607	648

Таблиця ДЗ.8 – Довідкова інформація про деякі НХР

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
1	Акрилонітрил	СЗНЗN	Безбарвна летюча легкозаймиста рідина з неприємним запахом	<p>Клас небезпеки - 2.  ГДК у повітрі робочої зони - 0,5 мг/м-3.  ГДК у повітрі населених пунктів -0,03 мг/м-3.  ГДК у воді водоймищ - 0,2 мг/л.  Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.  Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) з коефіцієнтом заповнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища.  Максимальний об'єм зберігання - 1000 т.  Вибухо- та пожежонебезпека: утворюють з повітрям вибухонебезпечні суміші, пари - в 1,9 раза важчі за повітря.  Розчиняється у воді і багатьох органічних розчинниках.  У разі з'єднання з водою утворює амід акрилової кислоти, у разі повного гідролізу дає акрилову кислоту</p>
2	Акролеїн	СЗН4O	Безбарвна рідина, дуже летюча, з різким запахом, сльозоточива, має низьку температуру кипіння	<p>Клас небезпеки - 2.  ГДК у повітрі робочої зони - 0,2 мг/м-3.  ГДК у повітрі населених пунктів - 0,03 мг/м-3.  Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.  Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) з коефіцієнтом заповнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища.  Вибухо- та пожежонебезпека: утворюють з повітрям вибухонебезпечні суміші.  Випари - важчі за повітря, накопичуються в низинах, підвалах, тунелях</p>



№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
3	Аміак	NH <sub>3</sub>	Безбарвний газ із задушливим різким запахом, легший за повітря, розчинний у воді	Клас небезпеки - 4. ГДК у робочій зоні - 20 мг/м-3. ГДК у повітрі населеного пункту: разова - 0,2 мг/м-3; добова - 0,04 мг/м-3. Перевезення та зберігання: у зрідженому стані під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2. Може зберігатися в ізотермічних резервуарах за атмосферного тиску. Димить у разі викидання в атмосферу. Вибухо- та пожежонебезпека: горючий, горить за наявності постійного вогню. Під час нагрівання ємності вибухають. З повітрям утворює вибухо-небезпечні суміші. Накопичується в низинах, тунелях, підвалах тощо
4	Ацетонітрил	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> N	Безбарвна легколетюча горюча рідина з ефірним запахом, легша за воду, горить яскравим безбарвним полум'ям	Клас небезпеки - 3. ГДК у повітрі робочої зони - 10 мг/м-3. ГДК у воді водойм - 0,7 мг/л. Перевезення: в контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які є місцем його тимчасового зберігання. Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) з коефіцієнтом заповнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища. Максимальний об'єм зберігання - 80 т. Вибухо- та пожежонебезпека: утворює з повітрям вибухонебезпечні суміші, випари - важчі за повітря
5	Ацетонціангідрин	C <sub>4</sub> H <sub>7</sub> NO	Безбарвна горюча рідина, на повітрі розкладається, легша за воду, легкозаймиста у разі нагрівання, легкорозчинна у воді та багатьох органічних розчинниках	Клас небезпеки - 2. ГДК у повітрі робочої зони - 0,9 мг/м-3. ГДК у воді водойм - 0,001 мг/л (1 мг/м-3). Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м <sup>3</sup> ) з коефіцієнтом заповнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища. Максимальний об'єм зберігання - 298 т. Вибухо- та пожежонебезпека: у суміші з повітрям вибухонебезпечна, випари - важчі за повітря
6	Бромоводень	HBr	Безбарвна негорюча рідина з різким запахом, важча за воду, розчинна у воді	Клас небезпеки - 3. ГДК у повітрі робочої зони - 2 мг/м <sup>3</sup> . ГДК у повітрі населених пунктів - 1 мг/м <sup>3</sup> . Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які є місцем його тимчасового зберігання. Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах з коефіцієнтом заповнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища. Максимальний об'єм зберігання - 2,5 т. Вибухо- та пожежонебезпека: корозійна для більшості металів, у взаємодії з металами займає, випари накопичуються в низьких ділянках поверхні, підвалах, тунелях
7	Бромометан	CH <sub>3</sub> Br	Безбарвний газ із характерним запахом, важчий за повітря в 3,3 раза	Клас небезпеки - 2. ГДК у повітрі робочої зони - 1 мг/м <sup>3</sup> . Перевезення: у залізничних і автомобільних цистернах, контейнерах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання. Зберігання: у горизонтальних циліндричних резервуарах (об'ємом 10-250 м <sup>3</sup> ) за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см <sup>2</sup> . Максимальний об'єм зберігання - 10 т.

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				Вибухо- та пожежонебезпека: з повітрям утворює вибухонебезпечні суміші. Розчинний у більшості органічних сполук, мало - у воді
8	Диметиламін	$(\text{CH}_3)_2\text{NH}$	Безбарвний горючий газ із різким аміачним запахом	Клас небезпеки - 2. ГДК у повітрі робочої зони - 1 мг/м-3. ГДК у повітрі населених пунктів - 0,05 мг/м-3. ГДК у воді водоймищ - 0,1 мг/л. Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання. Зберігання: у зрідженому стані в горизонтальних циліндричних резервуарах об'ємом (10-250 м-3) з коефіцієнтом заповнення 0,8 за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2. Максимальний об'єм зберігання - 160 т. Вибухо- та пожежонебезпека: утворює з повітрям вибухонебезпечні суміші. Важчий за повітря. Розчинний у воді. Під час виходу в атмосферу димить, накопичується в низинах, підвалах, тунелях. У разі зріджування утворює безбарвну летючу рідину з різким, дратівливим запахом, розчинну у воді, легшу за воду. Димить на повітрі з утворенням важчих за повітря парів
9	Етиленімін	$\text{C}_2\text{H}_5\text{N}$	Безбарвна, дуже рухлива, легкозаймиста рідина із запахом аміаку	Клас небезпеки - 1. ГДК у повітрі робочої зони - 0,02 мг/м-3. ГДК в атмосферному повітрі населених пунктів - 0,001 мг/м-3. Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання. Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) з коефіцієнтом за-

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				повнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища. Вибухо- та пожежонебезпека: легкозаймистий. Розчиняється у воді та органічних розчинниках. У воді повільно полімеризується в менш отруйну речовину, присутність кислот прискорює полімеризацію. Здійснює подразнювальну дію (пари подразнюють дихальні шляхи та шкіру людини)
10	Етиленсульфід	$C_2H_4S$	Безбарвна летюча горюча рідина з неприємним запахом	Клас небезпеки - 2. ГДК у повітрі робочої зони - 0,1 мг/м-3. ГДК в атмосферному повітрі населених пунктів - 0,5 мг/м-3. Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання. Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) з коефіцієнтом заповнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища. Вибухо- та пожежонебезпека: з повітрям утворюють вибухонебезпечні суміші. Пари - важчі за повітря, рідина трохи важча за воду та стійка до її дії, розкладається під час кип'ятіння. Під впливом соляної кислоти на холоді утворює хлоретилмеркаптан (основний продукт), діхлордіетилдісульфід, 1,4-дітіан. Мас подразнювальну, наркотичну та судомну дію
11	Етантіол (Етилмеркаптан)	$C_2H_5SH$	Безбарвна легкозаймиста рідина з неприємним запахом гнилої капусти	Клас небезпеки - 2. ГДК у повітрі робочої зони - 1 мг/м-3. Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				<p>Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах з коефіцієнтом заповнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища.</p> <p>Максимальний об'єм зберігання - 1,6 т.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: з повітрям утворюють вибухонебезпечні суміші.</p> <p>Пари - важчі за повітря. Погано розчиняється у воді, добре - в спирті та ефірі. Небезпечний у разі вдихання, ковтання, потрапляння на шкіру</p>
12	Метантиол (Метилмеркаптан)	CH <sub>4</sub> S	Безбарвний горючий газ із різким неприємним запахом	<p>Клас небезпеки - 2.</p> <p>ГДК у повітрі робочої зони - 0,8 мг/м-3.</p> <p>ГДК у повітрі населених пунктів - 0,00001 мг/м-3.</p> <p>ГДК у воді водоймищ - 0,0002 мг/л.</p> <p>Перевезення: у залізничних і автомобільних цистернах, контейнерах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.</p> <p>Зберігання: у зрідженому стані в наземних горизонтальних циліндричних резервуарах (об'ємом 10-250 м-3) за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: можливе займання на відстані. З повітрям утворює вибухонебезпечні суміші.</p> <p>Речовина розкладається у разі розігрівання і спалювання з утворенням токсичних оксидів сірки. Реагує з кислотами з утворенням вогнебезпечного токсичного газу (сірководень). Погано розчиняється у воді, добре - в спирті й ефірі</p>
13	Метиламін	CH <sub>5</sub> N	Безбарвний горючий газ із різким аміачним запахом	<p>Клас небезпеки - 2.</p> <p>ГДК у повітрі робочої зони - 1 мг/м-3.</p> <p>Перевезення: у залізничних і автомобільних цистернах,</p>

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				<p>контейнерах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.</p> <p>Зберігання: у наземних горизонтальних циліндричних резервуарах у зрідженому стані (об'ємом 10-250 м<sup>3</sup>) з коефіцієнтом заповнення 0,8 за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см<sup>2</sup>.</p> <p>Максимальний об'єм зберігання - 35 т.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: утворює з повітрям вибухонебезпечні суміші, самозаймається.</p> <p>Під час зрідження утворює безбарвну летючу рідину з різким, дратівливим запахом, розчинну у воді, легшу за воду, на повітрі димить та утворює пари, важчі за повітря. Накопичується в низинах, підвалах, тунелях</p>
14	Метилакрилат	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	Безбарвна малолетюча рідина	<p>Клас небезпеки - 4.</p> <p>ГДК у повітрі робочої зони - 5 мг/м<sup>3</sup>.</p> <p>ГДК у повітрі населених пунктів - 0,01 мг/м<sup>3</sup>.</p> <p>ГДК у воді водоймищ - 0,02 мг/л.</p> <p>Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.</p> <p>Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000м<sup>3</sup>) з коефіцієнтом заповнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища.</p> <p>Максимальний об'єм зберігання - 76 т.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: легкозаймиста рідина з різким запахом, з повітрям утворює вибухонебезпечні суміші. Легша за воду, малорозчинна, пари важчі за повітря, накопичуються в низинах, підвалах, тунелях</p>

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
15	Миш'яковистий водень	AsH <sub>3</sub>	Безбарвний газ, важчий за повітря, або рідина, важча за воду, у чистому вигляді без запаху, за наявності домішок діетиларсину пахне часником	<p>Клас небезпеки - 2. ГДК у повітрі робочої зони - 0,1 мг/м-3. ГДК у ґрунті - 2 мг/м-3. Перевезення: у зрідженому стані в контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які є місцем його тимчасового зберігання. Зберігання: зберігають у наземних горизонтальних циліндричних (об'ємом 10-250 м-3) резервуарах під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2 або в наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища. Вибухо- та пожежонебезпека: у разі взаємодії з повітрям утворює вибухонебезпечні суміші, самозаймається на повітрі. У разі нагрівання вище 5000 °С розкладається на водень і миш'як Має гостроспрямований механізм дії, що вимагає автоматичного контролю за вмістом речовини в повітрі</p>
16	Оксид азоту	NxOy NO NO <sub>2</sub>	Безбарвний Блідо-жовта рідина газ	<p>Клас небезпеки - 3. ГДК оксиду (діоксиду) у повітрі робочої зони - 5,0 (2,0) мг/м-3. ГДК оксиду (діоксиду) у повітрі населених пунктів - 0,085 (0,6) мг/м-3. Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання. Зберігання: у вертикальних циліндричних (об'ємом 50-5000 м-3) або горизонтальних циліндричних (об'ємом 5-100 м-3) резервуарах за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища.</p>

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				<p>Вибухо- та пожежонебезпека: є сильним окислювачем, органічні суміші загоряються, суміші з метаном, бутаном вибухають.</p> <p>Пари - важчі за повітря, мають бурий колір і задушливий запах. З водою утворює азотну кислоту.</p> <p>Має гостроспрямований механізм дії, що вимагає автоматичного контролю за вмістом речовини в повітрі</p>
17	Оксид етилену	$C_2H_4O$	Безбарвний газ із солодкуватим запахом, що нагадує ефір	<p>Клас небезпеки - 2.</p> <p>ГДК у повітрі робочої зони - 1,0 мг/м-3.</p> <p>ГДК у повітрі населених пунктів (середньодобова) - 0,3 мг/м-3.</p> <p>Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.</p> <p>Зберігання: у сферичних резервуарах (об'ємом 600-2000 м-3) за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2.</p> <p>Максимальний об'єм зберігання - 583 т.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: з повітрям утворює вибухонебезпечну суміш. Добре розчиняється у воді, спирті та інших органічних розчинниках. Важчий за повітря. Зріджується в безбарвну рухливу рідину з пекучим смаком, може полімеризуватися під час нагрівання під впливом кислот, основ, хлоридів і оксидів металів з можливим загоранням або вибухом.</p> <p>Розкладається у разі розігрівання вище 500 °С, внаслідок чого виникає небезпека пожежі та вибуху. Реагує бурхливо з багатьма сполуками. Срібло, мідь, ртуть або магній можуть реагувати з домішками до газу з утворенням вибухових сполук</p>



№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
18	Оксихлорид фосфору	$\text{POCl}_3$	Безбарвна високолетюча негорюча рідина	<p>Клас небезпеки - 1.  ГДК у повітрі робочої зони - 0,05 мг/м-3.  ГДК у воді водоймищ - 1,5 мг/л.  ГДК у ґрунті - 2,8 мг/кг.  Перевезення: у контейнерах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.  Зберігання: у балонах (об'ємом 0,005-0,08 м-3) за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища.  Вибухо- та пожежонебезпека: реагує бурхливо з водою з виділенням тепла і продуктів розкладання, а саме соляної і фосфорної кислот, зумовлюючи можливе займання і вибух.  Пари - важчі за повітря. Речовина розкладається у разі розігрівання з утворенням токсичних та їдких парів, у тому числі хлористого водню і оксидів фосфору. Реагує бурхливо зі спиртами, фенолами, амінами. Небезпечно забруднення повітря досягається дуже швидко під час випаровування за температури 20 °С</p>
19	Олеум	$\text{H}_2\text{SO}_4$	Безбарвна рідина, у вологому повітрі «димить» внаслідок реакції між парою $\text{SO}_3$ і $\text{H}_2\text{O}$ з утворенням важколетючої сульфатної кислоти $\text{H}_2\text{SO}_4$	<p>Клас небезпеки - 2.  ГДК у повітрі робочої зони - 1,0 мг/м-3.  Зберігання: в баках, розміщених в будівлі або під навісом. Концентровану сірчану кислоту і олеум зберігають в сталевих нефутерованих баках. Сталеві баки для зберігання особливо чистої, а також низькоконцентрованої сірчаної кислоти футерують кислотостійкою керамікою.  Перевезення: технічну сірчану кислоту перевозять в залізничних сталевих цистернах вантажопідйомністю до 50 т. Відвантаження дрібних партій сірчаної кислоти допускається</p>

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				в контейнерах, бочках ємністю до 1 т і в скляних бутлях ємністю 30-45 л. Перевезення олеуму проводиться в спеціальних цистернах, забезпечених теплоізоляцією. Щоб запобігти можливості замерзання олеуму в цистернах під час його перевезення, перед наливанням в цистерни олеум підігрівають
20	Сірчистий ангідрид (діоксид сірки)	SO <sub>2</sub>	Безбарвний газ із різким характерним запахом, важчий за повітря, розчинний у воді	Клас небезпеки - 3. ГДК у робочій зоні -10 мг/м-3. ГДК у повітрі населеного пункту: разова - 0,5 мг/м-3; добова - 0,05 мг/м-3. Перевезення: у залізничних та автомобільних цистернах, контейнерах і балонах. Зберігання: у горизонтальних циліндричних резервуарах (об'ємом 10-250 м-3) за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2. Зріджений сірчистий ангідрид зберігають у сферичних газгольдерах за температури навколишнього середовища та тиску 0,7-30 кгс/см-2. Димить у разі викидання в атмосферу. Розчиняється у воді з утворенням сірчистої кислоти. Вибухо- та пожежонебезпека: негорючий. У разі нагрівання ємності вибухають. Накопичується в низинах, тунелях, підвалах тощо
21	Синильна кислота (ціанистий водень)	HCN	Безбарвна легколетюча легкозаймиста рухома рідина із запахом мигдалю, легша за воду	Клас небезпеки - 2. ГДК у повітрі робочої зони - 0,3 мг/м-3. ГДК у повітрі населених пунктів - 0,01 мг/м-3. Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання. Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) з коефіцієнтом за-

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				повнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища. Максимальний об'єм зберігання - 2 т. Вибухо- та пожежонебезпека: легкозаймиста під час взаємодії з повітрям; утворює вибухонебезпечні суміші, які за силою вибуху перевершують тротил. Добре розчиняється у воді та в усіх органічних розчинниках (спиртах, ефірі, бензині та рідких вуглеводнях). Легко вбирається різними матеріалами (гума, текстиль, цегла, бетон, харчові продукти). Випари - легші за повітря
22	Сірководень	H <sub>2</sub> S	Безбарвний газ із різким неприємним запахом тухлих яєць, важчий за повітря, розчинний у воді	Клас небезпеки - 2. ГДК у робочій зоні - 10 мг/м-3. ГДК у повітрі населеного пункту: разова - 0,008 мг/м-3; добова - 0,008 мг/м-3. Перевезення: у залізничних та автомобільних цистернах, контейнерах і балонах. Зберігання: у сферичних газгольдерах (об'ємом 300-2000 м-3) за температури навколишнього середовища та тиску 0,7-30 кгс/см-2. Вибухо- та пожежонебезпека: горючий. З повітрям утворює вибухонебезпечні суміші. Під час нагрівання ємності вибухають. Накопичується в низинах, тунелях, підвалах тощо
23	Сірковуглець	CS <sub>2</sub>	Безбарвна рідина з ефірним запахом, пари - важчі за воду, нерозчинна у воді	Клас небезпеки - 2. ГДК у робочій зоні - 1 мг/м-3. ГДК у повітрі населеного пункту: разова - 0,03 мг/м-3; добова - 0,005 мг/м-3. Перевезення: у залізничних та автомобільних цистернах, контейнерах і балонах. Зберігання: у вертикальних циліндричних (об'ємом 50-

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				<p>5000 м-3) або горизонтальних циліндричних (об'ємом 5-100 м-3) резервуарах за атмосферного тиску та температури навколишнього середовища.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: легкозаймиста рідина, легко займається від іскор, полум'я та під час нагрівання. Може вибухати внаслідок самозаймання. Займається після гасіння пожежі. Пари утворюють з повітрям вибухонебезпечні суміші, які можуть поширюватися далеко від місця витоку. Існує небезпека вибуху парів у повітрі та в приміщенні.</p> <p>Накопичується в низинах, тунелях, підвалах тощо</p>
24	Соляна кислота (хлористий водень)	HCl	<p>У стані рідини - безбарвна рідина, легкокорозчинна у воді, має корозійну дію на більшість металів</p> <p>У стані газу - безбарвний газ із різким запахом, важчий за повітря</p>	<p>Клас безпеки - 3.</p> <p>ГДК у робочій зоні - 5 мг/м-3.</p> <p>ГДК у повітрі населеного пункту: разова - 0,2 мг/м-3; добова - 0,2 мг/м-3.</p> <p>Перевезення: у металевих залізничних та автомобільних цистернах, контейнерах, балонах, покритих шаром гуми.</p> <p>Зберігання: у наземних циліндричних вертикальних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) покритих шаром гуми, за атмосферного тиску та температури навколишнього середовища або в скляних бутлях об'ємом 20 л. Легко випаровується і димить у разі проливання.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: негорюча.</p> <p>У разі взаємодії з металами виділяється вибухонебезпечний газ - водень</p> <p>Клас безпеки - 3.</p> <p>ГДК у повітрі робочої зони - 5 мг/м-3.</p> <p>ГДК у повітрі населених пунктів: середньодобова - 0,02 мг/м-3, максимальна разова - 0,05 мг/м-3.</p> <p>Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах,</p>

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				<p>балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.</p> <p>Зберігання: у циліндричних (об'ємом 50-5000 м-3) резервуарах за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища.</p> <p>Максимальний об'єм зберігання - 100 т.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: негорючий, вибухонебезпечний у разі нагрівання. На повітрі димить внаслідок утворення з парами води крапель туману. Добре розчиняється у воді, менше - в органічних рідинах. За нормальних умов в одному об'ємі води розчиняється 450-500 об'ємів газу. Розчин хлористого водню у воді (27,5-35 %) утворює соляну кислоту, а 36 % - концентровану соляну кислоту</p>
25	Тетрахлорид титану	TiCl <sub>4</sub>	Безбарвна світло-жовта рідина з різким запахом, «димить» на повітрі	<p>Клас небезпеки - 2.</p> <p>ГДК у повітрі робочої зони - 1,0 мг/м-3.</p> <p>Температура плавлення - -24,0 °С,</p> <p>Температура кипіння - 136,6 °С.</p> <p>Щільність - 1,7 г/см-3.</p> <p>Перевезення: у цистернах з нержавіючої сталі.</p> <p>Зберігання: в темному прохолодному приміщенні в герметичній тарі (металеві бочки по 250 кг)</p>
26	Триметиламін	C <sub>3</sub> H <sub>9</sub> N	Безбарвний горючий газ із різким аміачним запахом	<p>Клас небезпеки - 3.</p> <p>ГДК у повітрі робочої зони - 5,0 мг/м-3.</p> <p>ГДК у воді водойм - 0,05 мг/м-3.</p> <p>Перевезення: у контейнерах, залізничних і автомобільних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.</p> <p>Зберігання: у зрідженому стані в горизонтальних циліндричних резервуарах (об'ємом 10-250 м-3) з коефіцієнтом заповнення 0,8 за температури навколишнього</p>

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				<p>середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: на повітрі димить, утворюючи з повітрям вибухонебезпечні суміші; можливе займання на відстані. Важчий за повітря, легший за воду, розчинний у воді. Накопичується в низинах, підвалах, тунелях.</p> <p>У разі зріджування утворює безбарвну летючу рідину з різким дратівливим запахом.</p> <p>Під час витоку дуже швидко досягається небезпечна концентрація газу в повітрі.</p> <p>Речовина розкладається у разі спалювання з утворенням токсичних парів, у тому числі оксидів азоту. Реагує бурхливо з окислювачами, кислотами, окислом етилену</p>
27	Трихлорид фосфору	PCl <sub>3</sub>	Безбарвна негорюча рідина, важча за воду	<p>Клас небезпеки - 2.</p> <p>ГДК у повітрі робочої зони - 0,2 мг/м-3.</p> <p>Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.</p> <p>Зберігання: у наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) з коефіцієнтом заповнення 0,9-0,95 за атмосферного тиску і температури навколишнього середовища.</p> <p>Максимальний об'єм зберігання - 100 т.</p> <p>Вибухо- та пожежонебезпека: негорючий.</p> <p>Димить на повітрі, пари - важчі за повітря. Речовина розкладається під час розігрівання з утворенням токсичних та їдких парів, у тому числі хлористого водню і оксидів фосфору. Реагує з окислювачами. Реагує бурхливо з водою з виділенням тепла і продуктів розкладання, включаючи соляну і фосфорну кислоти, зумовлюючи можливе займання і вибух.</p>

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				Реагує бурхливо зі спиртами, фенолами
28	Фосген	COCl <sub>2</sub>	Безбарвний газ із характерним солодкуватим запахом гнилих фруктів, прілого листя і мокрого сіна	Клас небезпеки - 2. ГДК у повітрі робочої зони - 0,5 мг/м-3. Перевезення: у контейнерах, залізничних і автомобільних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання. Зберігання: у зрідженому стані за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2 у наземних циліндричних горизонтальних резервуарах. Максимальний об'єм зберігання - 52 т. Вибухо- та пожежонебезпека: негорючий. Під час викиду (випливу) дуже швидко досягається небезпечна концентрація цього газу в повітрі. У газоподібному стані в 3,5 рази важчий за повітря, в рідкому - в 1,4 рази важчий за воду. Погано розчиняється у воді, легко - в органічних розчинниках бензині, толуолі, ксилолі, оцтовій кислоті тощо
29	Формальдегід (формалін)	CH <sub>2</sub> O	Безбарвний газ, розчинний у воді, пари - важчі за повітря	Клас небезпеки - 2. ГДК у робочій зоні - 0,5 мг/м-3. ГДК у повітрі населеного пункту: разова - 0,035 мг/м-3; добова - 0,003 мг/м-3. ГДК у повітрі населеного пункту: разова - 0,2 мг/м-3; добова - 0,04 мг/м-3. Перевезення: у залізничних та автомобільних цистернах, контейнерах і балонах. Зберігання: у горизонтальних циліндричних резервуарах (об'ємом 10-250 м-3) за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2. Максимальний об'єм зберігання - 220 т. Вибухо- та пожежонебезпека: горючий, легко займа-

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				ється від відкритого вогню. У суміші з повітрям та за високої температури здатен до самозаймання. Накопичується в низинах, тунелях, підвалах тощо
30	Фтор	F	Газ блідо-жовтого кольору з різким характерним запахом, схожим на суміш запахів хлору та озону	Клас небезпеки - 2. ГДК у повітрі робочої зони - 0,15 мг/м-3. ГДК у воді водоймищ - 1,5 мг/л. ГДК у ґрунті - 2,8 мг/кг. Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання. Зберігання: у зрідженому стані в наземних горизонтальних циліндричних (об'ємом 10-250 м-3) і кульових резервуарах (об'ємом 600-2000 м-3) під тиском власних парів 18 кгс/см-2. Вибухо- та пожежонебезпека: вибухонебезпечний, сильний окислювач, викликає горіння. Реагує з водою, утворюючи плавикову кислоту, з органічними речовинами реагує бурхливо (можливе займання). Важчий за повітря
31	Фтороводень	HF	Безбарвний газ (рідина) з різким запахом	Клас небезпеки - 1. ГДК у повітрі робочої зони - 0,5 мг/м-3. ГДК у повітрі населених пунктів: середньодобова - 0,005 мг/м <sup>3</sup> , максимальна разова - 0,02 мг/м-3. Перевезення: у залізничних і автомобільних цистернах, контейнерах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання. Зберігання: у зрідженому стані за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2 у наземних циліндричних горизонтальних резервуарах.



№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				Максимальний об'єм зберігання - 1,98 т. Вибухо- та пожежонебезпека: негорючий, вибухонебезпечний у разі нагрівання. Необмежено розчиняється у воді, утворюючи фтористоводневу (плавикову) кислоту з виділенням значної кількості тепла, інтенсивно реагує з багатьма силікатними матеріалами, у тому числі зі склом, кварцом, піском (двоокисом кремнію). На повітрі димить внаслідок утворення з парами води дрібних крапель розчину кислоти
32	Хлор	Cl	Зеленувато- жовтий газ із різким задушливим запахом, важчий за повітря, малорозчинний у воді, корозійно активний	Клас небезпеки - 2. ГДК у робочій зоні - 1 мг/м-3. ГДК у повітрі населеного пункту: разова - 0,1 мг/м-3; добова - 0,03 мг/м-3. Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах у стисненому або зрідженому стані. Зберігання: у циліндричних (об'ємом 10-250 м-3) і кульових (об'ємом 600-2000 м-3) резервуарах під тиском власних парів 18 кгс/см-2. У разі виникнення розгерметизації відбувається різке викидання хлору в концентрації, що перевищує смертельну в кілька разів. Димить у разі викидання в атмосферу. Під час випаровування 1 кг зрідженого хлору утворюється 315 л газоподібного. Вибухо- та пожежонебезпека: негорючий. Ємності під час нагрівання можуть вибухати. Взаємодія з металами у разі зволоження призводить до утворення горючих газів. Підтримує горіння. Накопичується в низинах, тунелях, підвалах тощо
33	Хлорометан	CH3Cl	Безбарвний горючий газ із солодкуватим запахом	Клас небезпеки - 3. ГДК у повітрі робочої зони - 5 мг/м-3.

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				<p>ГДК у повітрі населених пунктів - 0,06 мг/м-3.  Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.  Зберігання: у наземних горизонтальних циліндричних резервуарах (об'ємом 10-250 м-3) з коефіцієнтом заповнення 0,8 за температури навколишнього середовища під тиском власних парів 6-18 кгс/см-2.  Максимальний об'єм зберігання - 50 т.  Вибухо- та пожежонебезпека: можливе займання на відстані. Реагує бурхливо з порошкоподібним алюмінієм, порошкоподібним цинком, трихлоридом алюмінію і етиленом із можливим займанням і вибухом. Газ - важчий за повітря, може стелитися по землі, накопичуватися в приміщеннях з низькими стелями, викликаючи нестачу кисню. Агресивний щодо багатьох металів за наявності вологи. Речовина розкладається у разі спалювання з утворенням токсичних та їдких парів, у тому числі хлористого водню і фосгену</p>
34	Хлорпікрін	CCl3NO2	Блідо-жовта масляниста рідина з різким запахом, важча за воду, має низьку температуру кипіння, погано розчиняється у воді	<p>Клас небезпеки - 2.  ГДК у робочій зоні - 0,7 мг/м-3.  ГДК у повітрі населеного пункту: разова - 0,007 мг/м-3; добова - 0,007 мг/м-3.  Перевезення: в контейнерах, залізничних цистернах, балонах.  Зберігання: у вертикальних циліндричних (об'ємом 50-5000 м-3) або горизонтальних циліндричних (об'ємом 5-100 м-3) резервуарах за атмосферного тиску та температури навколишнього середовища.  Максимальний об'єм зберігання - 5 т.  Вибухо- та пожежонебезпека: під час нагрівання до те-</p>

№ з/п	Назва НХР	Хімічна формула	Агрегатний стан	Спосіб перевезення та зберігання
				<p>мператури 400-500 °С утворюється фосген.  Легко випаровується навіть взимку, утворюючи летальну концентрацію.  Влітку стійкість хлорпікрину мала, на відкритій місцевості вимірюється кількома хвилинами, але в низинах, у лісі летальна концентрація утримується декілька годин</p>
35	Хлорціан	CICN	Безбарвний горючий газ із різким задушливим запахом	<p>Клас небезпеки - 2.  ГДК у повітрі робочої зони - 0,5 мг/м-3.  ГДК у воді водоймищ - 0,07 мг/л.  ГДК у повітрі населених пунктів: середньодобова - 0,001 мг/м<sup>3</sup>, максимальна разова - 0,003 мг/м-3.  Перевезення: у контейнерах, залізничних цистернах, балонах, які можуть бути місцем тимчасового зберігання.  Зберігання: у наземних горизонтальних циліндричних резервуарах (об'ємом 10-250 м-3) під тиском власних парів 18 кгс/см-2 або в наземних вертикальних циліндричних резервуарах (об'ємом 50-5000 м-3) за атмосферного тиску та температури навколишнього середовища.  Вибухо- та пожежонебезпека: реагує бурхливо з водою з виділенням тепла і продуктів розкладання, включаючи соляну і фосфорну кислоти, зумовлюючи можливе займання і вибух.  Пари - важчі за повітря в 2,1 раза</p>

Таблиця ДЗ.9 – Значення глибини поширення вторинної хмари для деяких НХР  $\Gamma_{T_2}$  (км)

Маса НХР (т)	Інверсія, швидкість вітру (м/с)				Конвекція, швидкість вітру (м/с)				Ізотермія, швидкість вітру (м/с)				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	10
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Аміак													
1	0,37	0,33	0,31	0,30	0,12	0,12	0,12	0,12	0,22	0,21	0,20	0,20	0,19
10	1,52	1,37	1,29	1,24	0,24	0,35	0,35	0,35	0,75	0,71	0,69	0,68	0,64
30	2,98	2,69	2,53	2,43	0,40	0,59	0,59	0,59	1,34	1,28	1,24	1,22	1,14
50	4,08	3,68	3,46	3,32	0,51	0,75	0,75	0,75	1,77	1,68	1,64	1,60	1,50
100	6,24	5,63	5,30	5,08	0,70	1,03	1,03	1,03	2,56	2,44	2,37	2,32	2,18
150	8,00	7,22	6,80	6,51	0,85	1,25	1,25	1,25	3,18	3,03	2,94	2,89	2,71
300	12,24	11,04	10,40	9,96	1,17	1,72	1,72	1,72	4,61	4,39	4,27	4,18	3,92
500	16,74	15,11	14,22	13,63	1,49	2,18	2,18	2,18	6,06	5,77	5,61	5,50	5,15
1000	25,62	23,11	21,76	20,85	2,06	3,02	3,02	3,01	8,77	8,36	8,12	7,96	7,47
10000	105,20	94,91	89,36	85,63	6,02	8,82	8,82	8,82	30,07	28,65	27,85	27,29	25,60
Акролеїн													
1	3,66	3,30	3,11	2,98	0,67	0,67	0,67	0,67	1,59	1,51	1,47	1,44	1,35
10	15,03	13,56	12,77	12,23	1,97	1,96	1,96	1,96	5,38	5,13	4,98	4,88	4,58
30	29,49	26,60	25,05	24,00	3,28	3,28	3,28	3,27	9,68	9,23	8,97	8,79	8,24
50	40,34	36,40	34,27	32,84	4,16	4,16	4,16	4,16	12,73	12,12	11,79	11,55	10,83
100	61,72	55,68	52,43	50,24	5,75	5,74	5,74	5,74	18,44	17,57	17,08	16,74	15,70
150	79,15	71,41	67,24	64,43	6,94	6,94	6,94	6,93	22,91	21,82	21,21	20,79	19,50
200	94,43	85,19	80,22	76,86	7,94	7,93	7,93	7,93	26,72	25,45	24,74	24,25	22,74
Ацетонітрил													
1	0,10	0,09	0,08	0,08	0,04	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
10	0,41	0,37	0,35	0,32	0,11	0,11	0,11	0,11	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
30	0,80	0,73	0,68	0,63	0,18	0,18	0,18	0,18	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
50	1,10	0,99	0,93	0,87	0,23	0,23	0,23	0,23	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
100	1,68	1,52	1,43	1,33	0,31	0,31	0,31	0,31	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
150	2,16	1,95	1,83	1,70	0,38	0,38	0,38	0,38	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
200	2,58	2,32	2,19	2,03	0,43	0,43	0,43	0,43	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
Бромоводень													
1	1,21	1,09	1,03	0,98	0,34	0,34	0,34	0,34	0,65	0,62	0,61	0,59	0,56
10	4,96	4,47	4,21	4,03	0,99	0,99	0,99	0,98	2,24	2,14	2,08	2,04	1,91
Бромометан													
1	2,01	1,82	1,71	1,64	0,48	0,48	0,48	0,48	1,01	0,96	0,93	0,91	0,58
10	8,27	7,46	7,02	6,73	1,41	1,41	1,41	1,41	3,45	3,29	3,20	3,13	2,00
30	16,22	14,64	13,78	13,20	2,36	2,36	2,36	2,36	6,21	5,92	5,75	5,64	3,59
50	22,19	20,02	18,85	18,06	2,99	2,99	2,99	2,99	8,17	7,78	7,56	7,41	4,72
100	33,95	30,63	28,84	27,64	4,14	4,13	4,13	4,13	11,83	11,27	10,96	10,74	6,84
150	43,54	39,28	36,99	35,44	5,00	4,99	4,99	4,99	14,70	14,00	13,61	13,34	8,50
300	66,62	60,10	56,59	54,22	6,90	6,90	6,89	6,89	21,30	20,29	19,72	19,33	12,32
500	91,14	82,22	77,42	74,18	8,75	8,75	8,75	8,74	27,99	26,67	25,92	25,40	16,19
Диметиламін													
1	2,98	2,69	2,53	2,43	0,70	0,70	0,70	0,70	1,48	1,41	1,37	1,34	1,26
10	12,25	11,05	10,41	9,97	2,05	2,05	2,05	2,05	5,06	4,82	4,68	4,59	4,31

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
30	24,04	21,69	20,42	19,57	3,42	3,42	3,42	3,42	9,11	8,67	8,43	8,26	7,75
50	32,89	29,67	27,94	26,77	4,34	4,34	4,34	4,34	11,97	11,40	11,08	10,86	10,19
100	50,31	45,39	42,74	40,95	6,00	6,00	5,99	5,99	17,34	16,52	16,06	15,74	14,76
150	64,52	58,21	54,81	52,52	7,25	7,24	7,24	7,24	21,54	20,52	19,95	19,55	18,34
200	98,72	89,06	83,86	62,66	10,01	0,01	0,00	8,28	25,13	23,94	23,27	22,80	21,39
Миш'яковистий водень													
10	25,32	22,85	21,51	20,61	3,40	3,39	3,39	3,39	2,70	2,57	2,50	2,45	2,30
30	50,00	45,11	42,47	40,69	5,66	5,66	5,66	5,66	9,26	8,82	8,57	8,40	7,88
50	68,82	62,09	58,46	56,02	7,19	7,18	7,18	7,18	16,67	15,88	15,43	15,13	14,19
100	105,95	95,58	90,00	86,24	9,93	9,92	9,92	9,91	21,91	20,87	20,28	19,88	18,64
150	136,69	123,32	116,12	111,26	11,99	11,98	11,98	11,98	31,74	30,24	29,39	28,80	27,01
300	210,39	189,81	178,72	171,25	16,57	16,55	16,55	16,54	39,43	37,56	36,51	35,78	33,56
500	289,53	261,22	245,95	235,67	21,02	21,00	20,99	20,99	57,13	54,42	52,90	51,85	48,62
1000	445,57	402,00	378,51	362,68	29,03	29,01	29,00	28,99	75,08	71,53	69,53	68,14	63,91
2000	685,66	618,60	582,46	558,10	40,10	40,07	40,06	40,05	108,79	103,64	100,74	98,73	92,60
Оксид азоту													
10	5,24	4,72	4,45	4,26	0,92	0,92	0,92	0,92	2,22	2,12	2,06	2,02	1,89
30	10,27	9,27	8,73	8,36	1,54	1,54	1,54	1,54	4,00	3,81	3,71	3,63	3,41
50	14,05	12,68	11,94	11,44	1,95	1,95	1,95	1,95	5,26	5,01	4,87	4,77	4,48
100	21,50	19,40	18,26	17,50	2,70	2,69	2,69	2,69	7,62	7,26	7,06	6,92	6,49
150	27,57	24,88	23,42	22,44	3,26	3,25	3,25	3,25	9,47	9,02	8,77	8,59	8,06
300	42,19	38,06	35,84	34,34	4,50	4,49	4,49	4,49	13,72	13,07	12,70	12,45	11,68
500	57,71	52,07	49,03	46,98	5,71	5,70	5,70	5,70	18,03	17,18	16,69	16,36	15,35
1000	88,30	79,66	75,01	71,87	7,88	7,88	7,87	7,87	26,12	24,89	24,19	23,71	22,23
2000	135,09	121,88	114,76	109,96	10,89	10,88	10,88	10,87	37,85	36,06	35,05	34,35	32,22
Оксид етилену													
1	0,17	0,15	0,14	0,14	0,07	0,07	0,07	0,07	0,26	0,25	0,24	0,24	0,22
10	0,70	0,63	0,59	0,57	0,21	0,21	0,21	0,21	0,90	0,86	0,84	0,82	0,77
30	1,37	1,24	1,17	1,12	0,36	0,36	0,36	0,35	1,63	1,55	1,51	1,48	1,38
50	1,88	1,70	1,60	1,53	0,45	0,45	0,45	0,45	2,14	2,04	1,98	1,94	1,82
100	2,88	2,60	2,44	2,34	0,62	0,62	0,62	0,62	3,10	2,95	2,87	2,81	2,64
150	3,69	3,33	3,13	3,00	0,75	0,75	0,75	0,75	3,85	3,67	3,56	3,49	3,28
200	4,40	3,97	3,74	3,58	0,86	0,86	0,86	0,86	4,49	4,28	4,16	4,07	3,82
Оксихлорид фосфору													
1	8,86	7,99	7,53	7,21	1,36	1,36	1,36	1,36	3,50	3,33	3,24	3,17	2,98
Сірководень													
1	0,22	0,20	0,18	0,18	0,09	0,08	0,08	0,08	0,14	0,13	0,13	0,13	0,12
10	0,89	0,81	0,76	0,73	0,25	0,25	0,25	0,25	0,48	0,46	0,45	0,44	0,41
30	1,75	1,58	1,49	1,43	0,41	0,41	0,41	0,41	0,87	0,83	0,81	0,79	0,74
50	2,40	2,16	2,04	1,95	0,53	0,53	0,53	0,53	1,14	1,09	1,06	1,04	0,97
100	3,67	3,31	3,11	2,98	0,73	0,73	0,73	0,73	1,66	1,58	1,53	1,50	1,41
150	4,70	4,24	3,99	3,83	0,88	0,88	0,88	0,88	2,06	1,96	1,90	1,87	1,75
200	5,61	5,06	4,76	4,56	1,00	1,00	1,00	1,00	2,40	2,29	2,22	2,18	2,04
Сірчистий ангідрид (діоксин сірки)													
1	0,91	0,82	0,77	0,74	0,26	0,26	0,26	0,26	0,49	0,47	0,46	0,45	0,42
10	3,73	3,36	3,17	3,03	0,75	0,75	0,75	0,75	1,70	1,62	1,57	1,54	1,44
30	7,31	6,60	6,21	5,95	1,25	1,25	1,25	1,25	3,05	2,91	2,83	2,77	2,60
50	10,01	9,03	8,50	8,15	1,59	1,58	1,58	1,58	4,01	3,82	3,71	3,64	3,41

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
100	15,31	13,81	13,01	12,46	2,19	2,19	2,19	2,19	5,81	5,54	5,38	5,28	4,95
150	19,63	17,71	16,68	15,98	2,65	2,64	2,64	2,64	7,22	6,88	6,69	6,55	6,15
200	23,42	21,13	19,90	19,07	3,03	3,02	3,02	3,02	8,42	8,02	7,80	7,64	7,17
Синильна кислота (ціаністий водень)													
1	4,73	4,27	4,02	3,85	0,87	0,87	0,87	0,87	2,07	1,97	1,91	1,88	1,76
10	19,41	17,52	16,49	15,80	2,54	2,54	2,54	2,54	7,09	6,75	6,56	6,43	6,03
30	38,09	34,37	32,36	31,00	4,24	4,23	4,23	4,23	12,75	12,15	11,81	11,58	10,86
50	52,11	47,01	44,27	42,42	5,38	5,37	5,37	5,37	16,76	15,97	15,52	15,21	14,27
100	79,73	71,93	67,73	64,89	7,43	7,42	7,42	7,42	24,29	23,14	22,49	22,04	20,67
1500	419,87	378,80	356,67	341,76	26,23	26,21	26,20	26,19	103,42	98,53	95,77	93,86	88,03
3000	642,37	579,55	545,69	522,87	36,23	36,21	36,19	36,18	149,86	142,76	138,76	136,00	127,55
Соляна кислота (хлористий водень)													
1	0,74	0,66	0,62	0,60	0,22	0,22	0,22	0,22	0,41	0,39	0,38	0,37	0,35
10	3,02	2,73	2,57	2,46	0,64	0,64	0,64	0,64	1,41	1,34	1,31	1,28	1,20
Трихлорид фосфору													
1	0,88	0,79	0,75	0,72	0,24	0,24	0,24	0,24	0,47	0,45	0,44	0,43	0,40
10	3,61	3,26	3,07	2,94	0,70	0,70	0,70	0,70	1,62	1,54	1,50	1,47	1,38
30	7,08	6,39	6,02	5,76	1,17	1,17	1,17	1,17	2,91	2,77	2,69	2,64	2,48
50	9,69	8,74	8,23	7,89	1,49	1,49	1,49	1,49	3,82	3,64	3,54	3,47	3,25
100	14,82	13,37	12,59	12,06	2,06	2,06	2,06	2,06	5,54	5,28	5,13	5,03	4,71
150	19,01	17,15	16,15	15,47	2,49	2,48	2,48	2,48	6,88	6,55	6,37	6,24	5,86
300	29,08	26,24	24,70	23,67	3,43	3,43	3,43	3,43	9,97	9,50	9,23	9,05	8,49
500	39,78	35,89	33,80	32,38	4,36	4,35	4,35	4,35	13,10	12,48	12,13	11,89	11,15
1000	60,87	54,91	51,71	49,54	6,02	6,01	6,01	6,01	18,98	18,09	17,58	17,23	16,16
2000	93,12	84,02	79,11	75,80	8,31	8,31	8,30	8,30	27,51	26,20	25,47	24,96	23,4
Формальдегід (формалін)													
1	2,08	1,88	1,77	1,69	0,48	0,48	0,48	0,48	1,02	0,97	0,94	0,92	0,86
10	8,54	7,71	7,26	6,95	1,40	1,40	1,39	1,39	3,48	3,32	3,22	3,16	2,96
30	16,76	15,12	14,24	13,64	2,33	2,33	2,33	2,33	6,27	5,97	5,80	5,69	5,33
50	22,93	20,69	19,48	18,67	2,96	2,95	2,95	2,95	8,24	7,85	7,63	7,47	7,01
100	35,09	31,65	29,80	28,56	4,08	4,08	4,08	4,08	11,93	11,37	11,05	10,83	10,16
150	44,99	40,59	38,22	36,62	4,93	4,93	4,93	4,92	14,82	14,12	13,73	13,45	12,62
200	53,68	48,43	45,60	43,69	5,64	5,64	5,63	5,63	17,29	16,47	16,01	15,69	14,72
Фосген													
1	4,03	3,63	3,42	3,28	0,87	0,87	0,87	0,87	1,93	1,81	1,76	1,73	1,62
10	16,54	14,92	14,05	13,46	2,54	2,54	2,54	2,54	6,62	6,21	6,04	5,92	5,55
30	32,46	29,28	27,57	26,42	4,24	4,24	4,24	4,23	11,92	11,18	10,87	10,66	9,99
50	44,40	40,06	37,72	36,14	5,38	5,38	5,37	5,37	15,66	14,70	14,29	14,00	13,13
100	67,93	61,29	57,71	55,29	7,43	7,43	7,42	7,42	22,70	21,30	20,70	20,29	19,03
Фтор													
10	23,11	20,85	19,63	18,81	3,29	3,28	3,28	3,28	9,00	8,58	8,34	8,17	7,66
400	222,12	200,40	188,69	180,80	18,33	18,32	18,31	18,30	64,79	61,72	59,99	58,80	55,14
1000	389,69	351,58	331,03	317,19	28,09	28,07	28,06	28,05	105,77	100,77	97,95	95,99	90,03
1500	499,74	450,87	424,52	406,77	33,94	33,91	33,90	33,89	131,40	125,18	121,67	119,25	111,84
2000	596,20	537,89	506,47	485,29	38,81	38,78	38,76	38,75	153,26	146,00	141,92	139,09	130,45
2500	683,67	616,81	580,77	556,48	43,06	43,03	43,01	43,00	172,70	164,52	159,91	156,72	146,99
3000	764,58	689,80	649,50	622,34	46,88	46,84	46,82	46,81	190,39	181,37	176,30	172,78	162,05

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Фтороводень													
1	0,55	0,50	0,47	0,45	0,16	0,16	0,16	0,16	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26
10	2,26	2,04	1,92	1,84	0,46	0,46	0,46	0,46	1,04	0,99	0,96	0,94	0,88
30	4,44	4,01	3,77	3,62	0,77	0,77	0,77	0,77	1,87	1,78	1,73	1,69	1,59
50	6,08	5,48	5,16	4,95	0,98	0,97	0,97	0,97	2,45	2,34	2,27	2,23	2,09
100	9,30	8,39	7,90	7,57	1,35	1,35	1,35	1,35	3,55	3,39	3,29	3,23	3,02
150	11,92	10,76	10,13	9,71	1,63	1,63	1,63	1,63	4,41	4,21	4,09	4,01	3,76
200	14,23	12,83	12,08	11,58	1,86	1,86	1,86	1,86	5,15	4,91	4,77	4,67	4,38
Хлор													
1	2,78	2,46	2,32	2,22	0,61	0,61	0,61	0,61	1,31	1,25	1,22	1,19	1,12
10	11,41	10,10	9,51	9,11	1,78	1,78	1,78	1,78	4,50	4,29	4,17	4,08	3,83
30	22,39	19,82	18,66	17,88	2,97	2,97	2,97	2,97	8,10	7,71	7,50	7,35	6,89
50	30,63	27,12	25,53	24,47	3,77	3,77	3,77	3,77	10,64	10,14	9,86	9,66	9,06
100	46,87	41,49	39,06	37,43	5,21	5,21	5,20	5,20	15,42	14,69	14,28	14,00	13,13
150	60,10	53,21	50,10	48,00	6,29	6,29	6,29	6,29	19,16	18,25	17,74	17,39	16,31
300	91,95	81,40	76,65	73,44	8,69	8,69	8,68	8,68	27,76	26,44	25,70	25,19	23,63
500	125,80	111,36	104,86	100,47	11,03	11,02	11,02	11,02	36,48	34,75	33,78	33,11	31,05
1000	192,46	170,38	160,42	153,72	15,24	15,23	15,22	15,22	52,86	50,36	48,95	47,97	44,99
2000	294,45	260,67	245,44	235,18	21,05	21,03	21,02	21,02	76,59	72,96	70,92	69,51	65,19
Хлорпкрін													
1	2,09	1,88	1,77	1,70	0,27	0,27	0,27	0,27	0,76	0,72	0,70	0,69	0,64
10	8,60	7,76	7,31	7,00	0,80	0,80	0,80	0,80	2,59	2,47	2,40	2,35	2,20
30	16,87	15,22	14,33	13,73	1,33	1,33	1,33	1,33	4,66	4,44	4,31	4,23	3,97
50	23,08	20,82	19,61	18,79	1,69	1,69	1,69	1,69	6,12	5,83	5,67	5,56	5,21
100	35,31	31,86	30,00	28,74	2,33	2,33	2,33	2,33	8,87	8,45	8,22	8,05	7,55
150	45,29	40,86	38,47	36,86	2,82	2,82	2,82	2,81	11,02	10,50	10,21	10,00	9,38
300	69,29	62,51	58,86	56,40	3,89	3,89	3,89	3,89	15,97	15,21	14,79	14,49	13,59
500	94,79	85,52	80,52	77,16	4,94	4,94	4,93	4,93	20,99	20,00	19,44	19,05	17,87
1000	145,02	130,84	123,20	118,04	6,82	6,82	6,82	6,81	30,41	28,97	28,16	27,60	25,89
2000	221,88	200,18	188,48	180,60	9,43	9,42	9,42	9,41	44,07	41,98	40,81	39,99	37,51
Хлорціан													
10	10,47	9,45	8,89	8,52	1,69	1,69	1,69	1,68	4,23	4,03	3,92	3,84	3,60
30	20,54	18,53	17,45	16,72	2,82	2,81	2,81	2,81	7,62	7,26	7,06	6,92	6,49
50	28,10	25,35	23,87	22,88	3,57	3,57	3,57	3,57	10,02	9,54	9,28	9,09	8,53
100	43,00	38,79	36,52	35,00	4,93	4,93	4,93	4,93	14,52	13,83	13,44	13,17	12,36
150	55,14	49,75	46,84	44,88	5,96	5,96	5,95	5,95	18,03	17,18	16,70	16,36	15,35
300	84,36	76,11	71,66	68,67	8,23	8,23	8,22	8,22	26,13	24,89	24,19	23,71	22,24
500	115,41	104,12	98,04	93,94	10,44	10,44	10,43	10,43	34,34	32,71	31,80	31,16	29,23
1000	176,57	159,30	149,99	143,72	14,43	14,42	14,41	14,41	49,76	47,40	46,07	45,15	42,35
2000	270,14	243,72	229,48	219,89	19,93	19,91	19,91	19,90	72,09	68,68	66,76	65,43	61,36
3000	346,44	312,55	294,29	281,99	24,07	24,06	24,05	24,04	89,56	85,32	82,93	81,28	76,23

Таблиця ДЗ.10 – Значення глибини поширення вторинної хмари для деяких НХР  $\Gamma_2$  (км)

Назва НХР	Температура повітря, оС					
	-20	-10	0	+10	+20	+30
Акролеїн	0,2	0,4	0,4	0,8	1,0	2,2
Аміак (ізотермічний)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
Аміак (під тиском)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
Ацетонітрил	0,1	0,3	0,3	0,8	1,0	2,6
Бромоводень	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Бромометан	0,4	0,9	0,9	1,0	1,0	1,0
Диметиламін	0,3	0,6	0,8	0,9	1,0	1,0
Миш'яковистий водень	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Оксид азоту	0	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0
Оксид етилену	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9
Оксихлорид фосфору	0,1	0,7	0,7	0,9	1,0	2,6
Сірководень	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Сірчистий ангідрид (діоксин сірки)	0,6	0,7	1,0	1,0	1,0	1,1
Синильна кислота (ціанистий водень)	0	0,6	0,6	0,9	1,0	1,3
Соляна кислота (хлористий водень)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Трихлорид фосфору	0,2	0,7	0,8	0,9	1,0	2,3
Формальдегід (формалін)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Фосген	0,3	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0
Фтор	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Фтороводень	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0
Хлор (ізотермічний)	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
Хлор (під тиском)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
Хлорпкрін	0,1	0,2	0,3	0,7	1,0	2,9
Хлорціан	0	0,7	0,8	0,9	1,0	1,0

Таблиця ДЗ.11 – Значення кута  $\varphi$  залежно від ступеня вертикальної стійкості повітря в приземному шарі та довірчої імовірності  $P_\Gamma$

Вид хмари НХР та час випаровування	Стан атмосфери у приземному шарі повітря	Значення $P_\Gamma$		
		0,5	0,75	0,9
Первинна хмара НХР	інверсія	9	15	20
	ізотермія	12	20	25
	конвекція	15	25	30
Вторинна хмара НХР, час випаровування 2-6 год	інверсія	12	20	30
	ізотермія	15	25	40
	конвекція	20	35	50
Вторинна хмара НХР, час випаровування 6-12 год	ізотермія	22	37	52
Вторинна хмара НХР, час випаровування 12-24 год		30	50	70



Таблиця Д3.12 – Коефіцієнт захищеності виробничого персоналу  $K_3$  від дії НХР (хлору)

Місцезнаходження, засоби захисту, що застосовуються	Час перебування, год				
	0,25	0,5	1	2	3–4
відкрито на місцевості	0	0	0	0	0
у транспорті	0,95	0,75	0,41	-	-
у виробничих приміщеннях з кратністю повітрообміну:					
0,5	0,97	0,87	0,68	0,38	0,09
1,0	0,67	0,52	0,30	0,13	0
2,0	0,18	0,08	0,04	0	0
у сховищах:					
з режимом регенерації повітря	1	1	1	1	1
без режиму регенерації повітря	1	1	1	1	0
в засобах індивідуального захисту органів дихання (промислових протигазах)	0,95	0,8	0,5	0	0

Таблиця Д3.13 – Коефіцієнт захищеності міського та сільського населення  $K_3$  від дії НХР

Час доби, год	Міське населення					Сільське населення				
	Час, що пройшов з моменту виникнення аварії									
	15 хв	30 хв	1 год	2 год	3-4 год	15 хв	30 хв	1 год	2 год	3-4 год
<b>А. Населення не було оповіщено про небезпеку</b>										
1-6	0,95	0,89	0,76	0,36	0,09	0,72/0,87	0,69/0,84	0,60/0,72	0,28/0,33	0,07/0,15
6-7	0,84	0,72	0,64	0,29	0,07	0,39/0,59	0,37/0,57	0,32/0,48	0,15/0,23	0,10/0,05
7-10	0,64	0,54	0,35	0,13	0,02	0,24/0,24	0,23/0,23	0,20/0,20	0,10/0,10	0,02/0,02
10-13	0,69	0,58	0,37	0,15	0,03	0,19/0,19	0,18/0,18	0,16/0,16	0,08/0,08	0,02/0,02
13-15	0,72	0,64	0,47	0,20	0,04	0,17/0,24	0,14/0,23	0,12/0,20	0,06/0,10	0,02/0,02
15-17	0,68	0,58	0,37	0,15	0,03	0,15/0,48	0,14/0,46	0,12/0,40	0,06/0,19	0,02/0,05
17-19	0,69	0,62	0,47	0,19	0,04	0,19/0,59	0,18/0,57	0,16/0,48	0,08/0,23	0,02/0,05
19-1	0,88	0,82	0,67	0,30	0,07	0,48/0,78	0,46/0,73	0,40/0,64	0,19/0,30	0,05/0,07
<b>Б. Населення оповіщено про небезпеку</b>										
1-6	0,95	0,89	0,20	0,36	0,09	0,78/0,89	0,73/0,85	0,64/0,74	0,30/0,35	0,08/0,09
6-7	0,93	0,87	0,74	0,35	0,10	0,50/0,81	0,48/0,77	0,42/0,67	0,21/0,20	0,07/0,08
7-10	0,78	0,68	0,49	0,22	0,06	0,39/0,39	0,37/0,37	0,32/0,32	0,15/0,15	0,04/0,04
10-13	0,79	0,67	0,47	0,21	0,04	0,33/0,33	0,31/0,31	0,27/0,27	0,13/0,13	0,03/0,03
13-15	0,83	0,74	0,56	0,25	0,05	0,31/0,39	0,30/0,37	0,26/0,32	0,12/0,15	0,03/0,04
15-17	0,79	0,69	0,49	0,22	0,04	0,31/0,59	0,30/0,57	0,26/0,48	0,12/0,23	0,05/0,05
17-19	0,86	0,78	0,63	0,28	0,06	0,35/0,66	0,33/0,62	0,29/0,55	0,14/0,26	0,03/0,04
19-1	0,91	0,85	0,71	0,34	0,09	0,59/0,81	0,57/0,77	0,48/0,67	0,23/0,32	0,07/0,06

Таблиця ДЗ.14 – Час випаровування НХР за швидкості повітря 1 м/с

Назва НХР	Маса НХР (г)	Температура повітря, °С						
		-30	-20	-10	0	+10	+20	+30
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Азотна кислота	50 і більше	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	30,2 доби	20,2 доби	13,8 доби
Акрилонітріл	30*	8,2 доби	4,8 доби	2,9 доби	1,8 доби	1,2 доби	18,5 год	12,7 год
Акрилонітріл	50*	8,5 доби	4,9 доби	3 доби	1,9 доби	1,2 доби	19,2 год	13,2 год
	100	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	27,2 доби	17,6 доби	11,8 доби	8,1 доби
	150	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	28 діб	18,1 доби	12,1 доби	8,3 доби
	250	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	29 діб	18,8 доби	12,5 доби	8,6 доби
Аміак	50*	6,8 год	4,8 год	3,4 год	2,5 год	1,9 год	1,5 год	1,1 год
	100	4,2 доби	2,9 доби	2,1 доби	1,5 доби	1,2 доби	21,4 год	16,8 год
	500	4,7 доби	3,3 доби	2,3 доби	1,7 доби	1,3 доби	24 год	18,7 год
	2000	5,1 доби	3,6 доби	2,6 доби	1,9 доби	1,4 доби	1,1 доби	20,7 год
	10 000	5,8 доби	4 доби	2,9 доби	2,1 доби	1,6 доби	1,2 доби	23,1 год
	30 000	6,2 доби	4,3 доби	3,1 доби	2,3 доби	1,7 доби	1,3 доби	1 доба
Аміл	10*	2,3 доби	1,1 доби	13,6 год	7,3 год	4,1 год	2,4 год	1,4 год
	30*	2,5 доби	1,2 доби	14,7 год	7,8 год	4,4 год	2,6 год	1,5 год
	50*	2,6 доби	1,2 доби	15,2 год	8,1 год	4,6 год	2,7 год	1,6 год
	100	>1 міс.	18,3 доби	9,3 доби	5 доби	2,8 доби	1,6 доби	23,5 год
Гептил (несиметричний диметилгідрозин)	30*	8,9 доби	4,7 доби	2,6 доби	1,5 доби	21,4 год	13,3 год	8,6 год
	50*	9,2 доби	4,8 доби	2,7 доби	1,5 доби	22,2 год	13,8 год	8,9 год
	100 і більше	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	22,6 доби	13,6 доби	8,5 доби	5,4 доби
Гідрозин	30*	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	24,5 доби	13,8 доби
	50*	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	25,5 доби	14,3 доби
	100 і більше	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.	>1 міс.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Оксид етилену	10	8,2 доби	5,3 доби	3,5 доби	2,4 доби	1,7 доби	1,2 доби	22,2 год
Оксид етилену	50	9,1 доби	5,9 доби	3,9 доби	2,7 доби	1,9 доби	1,4 доби	1,2 доби
Оксид етилену	100	9,6 доби	6,2 доби	4,1 доби	2,9 доби	2 доби	1,5 доби	1,1 доби
Оксид азоту	10	6,5 доби	5,3 доби	4,4 доби	3,7 доби	3,2 доби	2,7 доби	2,4 доби
	50	7,3 доби	6 діб	4,9 доби	4,2 доби	3,6 доби	3,1 доби	2,7 доби
	100	7,7 доби	6,3 доби	5,2 доби	4,4 доби	3,7 доби	3,2 доби	2,8 доби
Сірковуглець	10*	2,5 доби	1,5 доби	21,8 год	14 год	9,3 год	6,3 год	4,4 год
	30*	2,7 доби	1,6 доби	23,6 год	15,1 год	10 год	6,8 год	4,8 год
	50*	2,8 доби	1,6 доби	1 доба	15,6 год	10,4 год	7,1 год	5 год
	100	>1 міс.	24,2 доби	14,9 доби	9,6 доби	6,3 доби	4,3 доби	3 доби
	150	>1 міс.	24,9 доби	15,4 доби	9,9 доби	6,5 доби	4,5 доби	3,1 доби
Сірчистий ангідрид (діоксид сірки)	25	4 доби	2,6 доби	1,8 доби	1,3 доби	21,1 год	16,2 год	12,2 год
	50	4,2 доби	2,8 доби	1,9 доби	1,3 доби	23,1 год	17 год	12,8 год
	100	4,4 доби	2,9 доби	2 доби	1,4 доби	1 доба	17,9 год	13,5 год
Фосген	1*	4,2 год	3,2 год	2,5 год	2 год	1,6 год	1,3 год	1,1 год
	10*	4,9 год	3,7 год	2,9 год	2,3 год	1,9 год	1,6 год	1,3 год
	100	3,3 доби	2,6 доби	2 доби	1,6 доби	1,3 доби	1,1 доби	21,4 год
Фтороводень	20*	13,6 год	12,3 год	11,1 год	10,2 год	9,4 год	8,7 год	8,1 год
	50*	14,5 год	13,1 год	11,9 год	10,9 год	10 год	9,3 год	8,6 год
	100	8,9 доби	8 діб	7,3 доби	6,6 доби	6,1 доби	5,7 доби	5,3 доби
Хлор	1*	1,8 год	1,3 год	0,9 год	0,7 год	0,5 год	0,4 год	0,3 год
	10*	2,1 год	1,5 год	1,1 год	0,8 год	0,6 год	0,5 год	0,4 год
	100	1,5 доби	1 доби	17,4 год	12,8 год	9,6 год	7,4 год	5,8 год
	500	1,6 доби	1,1 доби	19,5 год	14,4 год	10,8 год	8,3 год	6,5 год
	1000	1,7 доби	1,2 доби	1 доба	15,1 год	11,3 год	8,7 год	6,8 год
Синильна кислота (ціаністий водень)	1*	1,2 доби	17,6 год	11,6 год	7,9 год	5,5 год	4 год	2,9 год

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	30*	1,5 доби	22,3 год	14,7 год	10 год	7 год	5 год	3,7 год
	50*	1,5 доби	23,1 год	15,2 год	10,4 год	7,3 год	5,2 год	3,8 год
	100	22,3 доби	14,2 доби	9,3 доби	6,3 доби	4,4 доби	3,2 доби	2,3 доби
	150	22,9 доби	14,6 доби	9,6 доби	6,5 доби	4,6 доби	3,3 доби	2,4 доби
	250	23,8 доби	15,1 доби	9,9 доби	6,8 доби	4,7 доби	3,4 доби	2,5 доби

**Примітка.**

Позначкою «\*» відмічені значення за умови виливу НХР на поверхню землі «вільно».

Таблиця ДЗ.15 – Значення коефіцієнта  $K_u$  залежно від швидкості вітру

Швидкість вітру $u$ (м/с)	1	2	3	4	5	6
$K_u$	1,0	0,70	0,55	0,43	0,37	0,32

Таблиця ДЗ.16 – Швидкість перенесення переднього фронту хмари забрудненого повітря  $V$  залежно від швидкості вітру  $u$  та ступеня вертикальної стійкості повітря в приземному шарі

Швидкість вітру $u$ (м/с)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Значення швидкості перенесення переднього фронту хмари забрудненого повітря $V$ (км/год)	<b>Інверсія</b>									
	5	10	16	21						
	<b>Ізотермія</b>									
	6	12	18	24	29	35	41	47	53	59
	<b>Конвекція</b>									
	7	14	21	28						

## ТАБЛИЦІ ЗНАЧЕНЬ ДЕЯКИХ ФУНКЦІЙ

Таблиця Д.4.1 – Значення функції  $f(x)$ , що описує щільність нормованого нормального розподілу випадкової величини  $x$

Таблиця значень функції $f(x)$					
$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
0,00	0,3989	1,35	0,1604	2,70	0,0104
0,05	0,3984	1,40	0,1497	2,75	0,0091
0,10	0,3970	1,45	0,1394	2,80	0,0079
0,15	0,3945	1,50	0,1295	2,85	0,0069
0,20	0,3910	1,55	0,1200	2,90	0,0060
0,25	0,3867	1,60	0,1109	2,95	0,0051
0,30	0,3814	1,65	0,1023	3,00	0,0044
0,35	0,3752	1,70	0,0940	3,05	0,0038
0,40	0,3683	1,75	0,0863	3,10	0,0033
0,45	0,3605	1,80	0,0790	3,15	0,0028
0,50	0,3521	1,85	0,0721	3,20	0,0024
0,55	0,3429	1,90	0,0656	3,25	0,0020
0,60	0,3332	1,95	0,0596	3,30	0,0017
0,65	0,3230	2,00	0,0540	3,35	0,0015
0,70	0,3123	2,05	0,0488	3,40	0,0012
0,75	0,3011	2,10	0,0440	3,45	0,0010
0,80	0,2897	2,15	0,0396	3,50	0,0009
0,85	0,2780	2,20	0,0355	3,55	0,0007
0,90	0,2661	2,25	0,0317	3,60	0,0006
0,95	0,2541	2,30	0,0283	3,65	0,0005
1,00	0,2420	2,35	0,0252	3,70	0,0004
1,05	0,2299	2,40	0,0224	3,75	0,0004
1,10	0,2179	2,45	0,0198	3,80	0,0003
1,15	0,2059	2,50	0,0175	3,85	0,0002
1,20	0,1942	2,55	0,0154	3,90	0,0002
1,25	0,1826	2,60	0,0136	3,95	0,0002
1,30	0,1714	2,65	0,0119	4,00	0,0001

Таблиця Д.4.2. Значення інтегральної функції Лапласа  $\Phi(x)$ 

Інтегральна функція Лапласа					
$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$	$x$	$\Phi(x)$
0,00	0,0000	1,10	0,3643	2,25	0,4878
0,05	0,0040	1,15	0,3749	2,30	0,4893
0,10	0,0389	1,20	0,3849	2,35	0,4907
0,15	0,0596	1,25	0,3944	2,40	0,4918
0,20	0,0793	1,30	0,4032	2,45	0,4929
0,25	0,0987	1,35	0,4115	2,50	0,4938
0,30	0,1179	1,40	0,4192	2,55	0,4947
0,35	0,1368	1,45	0,4265	2,60	0,4953
0,40	0,1554	1,50	0,4332	2,65	0,4960
0,45	0,1736	1,55	0,4394	2,70	0,4965
0,50	0,1915	1,60	0,4452	2,75	0,4970
0,55	0,2088	1,65	0,4505	2,80	0,4974
0,60	0,2257	1,70	0,4554	2,85	0,4978
0,65	0,2422	1,75	0,4599	2,90	0,4981
0,70	0,2580	1,80	0,4641	2,95	0,4985
0,75	0,2734	1,85	0,4678	3,00	0,49865
0,80	0,2881	1,90	0,4713	3,2	0,49931
0,85	0,3023	1,95	0,4750	3,4	0,49966
0,90	0,3159	2,00	0,4772	3,6	0,499984
0,95	0,3289	2,05	0,4798	3,8	0,499993
1,00	0,3413	2,10	0,4821	4,0	0,499997

ПРИКЛАДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ  
НЕВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА СИСТЕМ

5.1. Визначення кількісних характеристик надійності за статистичними даними про відмови об'єкта

Задача 5.1.1.

На випробування поставлено 1000 однотипних об'єктів, за 3000 годин відмовило 80 об'єктів. Необхідно визначити  $P^*(t)$ ,  $Q^*(t)$  при  $t=3000$  год.

Розв'язок.

В даному випадку  $N=1000$ ;  $N(t)=1000-80=920$ ;  $n(t)=80$ .

$$P^*(3000) = \frac{N(t)}{N} = \frac{920}{1000} = 0,92;$$

$$Q^*(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{80}{1000} = 0,08;$$

$$Q^*(3000) = 1 - P^*(3000) = 1 - 0,92 = 0,08.$$

Задача 5.1.2.

На випробування було поставлено 1000 однотипних об'єктів. За перших 3000 годин відмовило 80 об'єктів, а за інтервал часу 3000-4000 годин відмовило ще 50 об'єктів. Необхідно визначити статистичну оцінку щільності розподілу та інтенсивності відмов об'єктів в інтервалі часу 3000-4000 годин.

Розв'язок.

В даному випадку  $N=1000$ ;  $t=3000$  годин;  $\Delta t = 1000$  годин;  $\Delta n(t) = 50$ ;  $N(t) = 920$ .

$$f^*(t) = f^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год.}$$

$$\lambda^*(t) = \lambda^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N(t)} = \frac{50}{1000 \cdot 920} = 5,43 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год.}$$

Задача 5.1.3.

На випробування поставлено  $N = 400$  виробів. За час  $t=3000$  годин відмовило 200 виробів, тобто  $N(t)=400-200=200$ . За інтервал часу  $(t, t + \Delta t)$ , де  $\Delta t = 100$  годин, відмовило 100 виробів, тобто  $\Delta n(t) = 100$ . Необхідно визначити  $P^*(3000)$ ,  $P^*(3100)$ ,  $f^*(3000)$ ,  $\lambda^*(3000)$ .

*Розв'язок.*

Знаходимо:

$$P^*(3000) = \frac{N(t)}{N} = \frac{200}{400} = 0,5;$$

$$P^*(3100) = \frac{N(t)}{N} = \frac{100}{400} = 0,25.$$

Використовуючи розрахункові формули для щільності розподілу відмов та інтенсивності відмов, отримаємо:

$$f^*(t) = f^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{100}{400 \cdot 100} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ (1/год.)}$$

$$\lambda^*(t) = \lambda^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{\Delta t \cdot N(t)} = \frac{100}{100 \cdot 200} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ (1/год.)}$$

*Задача 5.1.4.*

На випробування поставлено 6 однотипних виробів. Отримані наступні значення  $t_i$  ( $t_i$  - час безвідмовної роботи  $i$ -го виробу) :  $t_1 = 280$  годин;  $t_2 = 350$  годин;  $t_3 = 400$  годин;  $t_4 = 320$  годин;  $t_5 = 380$  годин;  $t_6 = 330$  годин.

Визначити статистичну оцінку середнього наробітку до відмови виробу.

*Розв'язок.*

Обчислимо середній наробіток до відмови виробу:

$$T_0^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{280 + 350 + 400 + 320 + 380 + 330}{6} = 343,3 \text{ год.}$$

*Задача 5.1.5.*

За спостережуваній період експлуатації в апаратурі було зафіксовано 7 відмов. Час відновлення склав:  $t_1 = 12$  хв;  $t_2 = 23$  хв;  $t_3 = 15$  хв;  $t_4 = 9$  хв;  $t_5 = 17$  хв;  $t_6 = 28$  хв;  $t_7 = 25$  хв;  $t_8 = 31$  хв.

Необхідно визначити середній час відновлення апаратури  $t_{\hat{a}}^*$ .

*Розв'язок.*

$$t_{\hat{a}}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{12 + 23 + 15 + 9 + 17 + 28 + 25 + 31}{8} = 20 \text{ хв.}$$

*Задача 5.1.6.*

В результаті спостереження за 45 зразками радіоелектронного устаткування отримані дані до першої відмови всіх 45 зразків, зведені в таблицю Д.5.1.



Необхідно визначити середній наробіток до відмови  $T_0^*$ .

Таблиця Д.5.1

$\Delta t_i$ , годин	$n_i$	$\Delta t_i$ , годин	$n_i$	$\Delta t_i$ , годин	$n_i$
0-5	1	30-35	4	60-65	3
5-10	5	35-40	3	65-70	3
10-15	8	40-45	0	70-75	3
15-20	2	45-50	1	75-80	1
20-25	5	50-55	0		
25-30	6	55-60	0		

*Розв'язок.*

В даному випадку:

$$t_{cp.1} = 2,5; t_{cp.2} = 7,5; t_{cp.3} = 12,5; t_{cp.4} = 17,5; t_{cp.5} = 22,5; t_{cp.6} = 27,5;$$

$$t_{cp.7} = 32,5; t_{cp.8} = 37,5; t_{cp.9} = 42,5; t_{cp.10} = 47,5; t_{cp.11} = 52,5; t_{cp.12} = 57,5;$$

$$t_{cp.13} = 62,5; t_{cp.14} = 67,5; t_{cp.15} = 72,5; t_{cp.16} = 77,5; N = 45; m = 16.$$

Обчислимо  $T_0^*$ :

$$T_0^* \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m n_i \cdot t_{cp.i} = \frac{1 \cdot 2,5 + 5 \cdot 7,5 + 8 \cdot 12,5 + 2 \cdot 17,5 + 5 \cdot 22,5 + 6 \cdot 27,5 + 4 \cdot 32,5 + 3 \cdot 37,5 + 0 \cdot 42,5 + 1 \cdot 47,5 + 0 \cdot 52,5 + 0 \cdot 57,5 + 3 \cdot 62,5 + 3 \cdot 72,5 + 1 \cdot 77,5}{45}$$

$$= \frac{1427,5}{45} = 31,7 (\tilde{a} \ddot{a})$$

### *Завдання для самостійної роботи*

*Задача 5.1.7.* На випробування поставлено 100 однотипних виробів. За 4000 годин відмовило 50 виробів. За інтервал часу 4000 - 4100 годин відмовило ще 20 виробів. Потрібно визначити  $f^*(t)$ ,  $\lambda^*(t)$  при  $t=4000$  годин.

*Задача 5.1.8.* На випробування поставлено 100 однотипних виробів. За 4000 годин відмовило 50 виробів. Потрібно визначити  $P^*(t)$  и  $Q^*(t)$  при  $t=4000$  годин.

*Задача 5.1.9.* Протягом 1000 годин з 10 гіроскопів відмовило 2. За інтервал часу 1000-1100 годин відмовив ще один гіроскоп. Потрібно визначити  $f^*(t)$ ,  $\lambda^*(t)$  при  $t=1000$  годин.

*Задача 5.1.10.* На випробування поставлено 1000 однотипних об'єктів. За перших 3000 годин відмовило 80 об'єктів. За інтервал часу 3000 - 4000 годин відмовило ще 50 об'єктів. Потрібно визначити  $P^*(t)$  и  $Q^*(t)$  при  $t=4000$  годин.

*Задача 5.1.11.* На випробування поставлено 1000 виробів. За час  $t=1300$  годин відмовило 288 виробів. За подальший інтервал часу 1300-1400 годин відмовило ще 13 виробів. Необхідно обчислити  $P^*(t)$  при  $t=1300$  годин та  $t=1400$  годин;  $f^*(t)$ ,  $\lambda^*(t)$  при  $t=1300$  годин.

*Задача 5.1.12.* На випробування поставлено 45 виробів. За час  $t=60$  години вийшло з ладу 35 виробів. За подальший інтервал часу 60-65 годин вийшло з ладу ще 3 вироби. Необхідно обчислити  $P^*(t)$  при  $t=60$  годин та  $t=65$  годин;  $f^*(t)$ ,  $\lambda^*(t)$  при  $t=60$  годин.

*Задача 5.1.13.* В результаті спостереження за 45 зразками радіоелектронного устаткування, які пройшли попередню 80-годинну приробку, отримані дані щодо першої відмови всіх 45 зразків, зведені в таблицю Д.5.2. Необхідно визначити  $T_0^*$ .

Таблиця Д.5.2

$\Delta t_i$ ,годин.	$n_i$	$\Delta t_i$ ,годин.	$n_i$	$\Delta t_i$ ,годин.	$n_i$
0-10	19	30-40	3	60-70	1
10-20	13	40-50	0		
20-30	8	50-60	1		

*Задача 5.1.14.* На випробування поставлено 8 однотипних виробів. Отримані наступні значення часу безвідмовної роботи  $i$ -го виробу:  $t_1 = 560$  годин;  $t_2 = 700$  годин;  $t_3 = 800$  годин;  $t_4 = 650$  годин;  $t_5 = 580$  годин;  $t_6 = 760$  годин;  $t_7 = 920$  годин;  $t_8 = 850$  годин. Визначити статистичну оцінку середнього наробітку до відмови виробу.

*Задача 5.1.15.* За спостережуваний період експлуатації в апаратурі було зареєстровано 6 відмов. Час відновлення склав:  $t_1 = 15$  хв.;  $t_2 = 20$  хв.;  $t_3 = 10$  хв.;  $t_4 = 28$  хв.;  $t_5 = 22$  хв.;  $t_6 = 30$  хв.

Необхідно визначити середній час відновлення апаратури  $t_{\hat{a}}^*$ .

*Задача 5.1.16.* На випробування поставлено 1000 виробів. За час  $t=11000$  годин вийшло з ладу 410 виробів. За подальший інтервал часу 11000-12000 годин вийшло з ладу ще 40 виробів. Необхідно обчислити  $P^*(t)$  при  $t=11000$  годин та  $t=12000$  годин, а також  $f^*(t), \lambda^*(t)$  при  $t=11000$  годин.

*5.2. Аналітичне визначення кількісних характеристик надійності об'єкта*

*Задача 5.2.1.*

Час роботи елемента має експоненціальний закон розподілу з параметром  $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$  1/год.

Необхідно обчислити кількісні характеристики надійності елемента  $P(t), Q(t), f(t), T_0$  для  $t=1000$  годин.

*Розв'язок.*

1. Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-\lambda t} = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t} .$$
$$P(1000) = e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = e^{-0,025} = 0,9753 .$$

2. Обчислимо ймовірність відмови:

$$Q(1000) = 1 - P(1000) = 0,0247 .$$

3. Обчислимо щільність розподілу відмов:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot P(t) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot t} ;$$
$$f(1000) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9753 = 2,439 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год.}$$

4. Обчислимо середній наробіток до відмови:

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ год.}$$

*Задача 5.2.2.*

Час роботи елемента має нормальний закон розподілу з параметрами  $T_0 = 8000$  годин,  $\sigma = 2000$  годин. Потрібно обчислити кількісні характеристики надійності  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$  для  $t=10000$  годин.

*Розв'язок.*

1. Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = 0,5 - \Phi(x); \quad x = \frac{t - T_0}{\sigma};$$
$$x = (10000 - 8000) / 2000 = 1; \quad \Phi(1) = 0,3413;$$
$$P(10000) = 0,5 - 0,3413 = 0,1587;$$

2. Визначимо щільність розподілу відмов  $f(t)$ :

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp \left[ -\frac{(t - T_0)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right];$$

Перейдемо до щільності нормованого нормального розподілу:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}}; \quad f(-x) = f(x).$$

Тоді:

$$f(t) = f(x) / \sigma;$$
$$f(10000) = f(1) / 2000 = 0,242 / 2000 = 12,1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год.}$$

3. Розрахуємо інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ :

$$\lambda(t) = f(t) / P(t).$$
$$\lambda(10000) = f(10000) / P(10000) = 12,1 \cdot 10^{-5} / 0,1587 = 76,4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год.}$$

Слід відзначити, що для обчислень значень функцій  $f(x)$  і  $\Phi(x)$  використовувались таблиці, що наведені в Додатку 1.

*Задача 5.2.3.*

Час роботи виробу має закон розподілу Релея. Необхідно обчислити кількісні характеристики надійності виробу  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$ ,  $T_0$  для  $t=1000$  годин, якщо параметр розподілу  $\sigma_t = 1000$  годин.

*Розв'язок.*

1. Обчислимо ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ :

$$P(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right);$$
$$P(1000) = \exp\left(-\frac{1000^2}{2 \cdot 1000^2}\right) = e^{-0,5} = 0,606.$$

2. Визначимо щільність розподілу відмов  $f(t)$ :

$$f(t) = t \cdot P(t) / \sigma_t^2;$$
$$f(1000) = 1000 \cdot 0,606 / 1000^2 = 0,606 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

3. Розрахуємо інтенсивність відмов:

$$\lambda(t) = \frac{t}{\sigma_t^2}$$
$$\lambda(1000) = \frac{1000}{1000^2} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

4. Визначимо середній наробіток до відмови виробу :

$$T_0 = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1000 \cdot 1,253 = 1253 \text{ год.}$$

*Задача 5.2.4.*

Час безвідмовної роботи виробу має закон розподілу Вейбулла з параметрами  $k = 1,5$ ;  $a = 10^{-4}$  1/год. Необхідно обчислити кількісні характеристики надійності виробу  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$ ,  $T_0$  при  $t=100$  годин.

*Розв'язок.*

1. Визначимо ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-a \cdot t^k}; \quad P(100) = \exp\left(-10^{-4} \cdot 100^{1,5}\right); \quad x = 100^{1,5};$$

$$\lg x = 1,5 \lg 100 = 3; \quad x = 1000; \quad P(100) = e^{-0,1} = 0,9048.$$

2. Визначимо щільність розподілу відмов  $f(t)$ :

$$f(t) = akt^{k-1} \cdot P(t)$$

$$f(100) = 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 100^{0,5} \cdot 0,9048 \approx 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

3. Визначимо інтенсивність відмов  $\lambda(t)$ :

$$\lambda(t) = f(t) / P(t);$$

$$\lambda(100) = f(100) / p(100) = 1,35 \cdot 10^{-3} / 0,9048 \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

4. Визначимо середній наробіток до відмови виробу  $T_0$ :

$$T_0 = \frac{\frac{1}{k} \cdot \tilde{A}\left(\frac{1}{k}\right)}{\frac{1}{a^k}} = \frac{\frac{1}{1,5} \cdot \tilde{A}\left(\frac{1}{1,5}\right)}{\left(10^{-4}\right)^{1/1,5}} = \frac{0,606 \cdot \tilde{A}(0,606)}{10^{-2,666}}.$$

Оскільки  $z \cdot \tilde{A}(z) = \tilde{A}(z+1)$ , то

$$T_0 = \frac{\cdot \tilde{A}(1,606)}{10^{-2,666}};$$

$$x = 10^{-2,666} = 0,00215.$$

Таким чином:

$$T_0 = \frac{0,90167}{0,00215} = 426 \text{ год.}$$

*Задача 5.2.5.*

В результаті аналізу даних про відмови апаратури отримано щільність розподілу відмов у вигляді:

$$f(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 \cdot t}.$$

Необхідно визначити:  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_0$ .

*Розв'язок.*

1. Визначимо ймовірність безвідмовної роботи:

$$\begin{aligned} P(t) &= 1 - \int_0^t f(t) dt = 1 - \left[ \int_0^t c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} dt + \int_0^t c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 \cdot t} dt \right] = \\ &= 1 - \left[ -c_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} \Big|_0^t - c_2 e^{-\lambda_2 \cdot t} \Big|_0^t \right] = 1 - \left[ -c_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} + c_1 - c_2 e^{-\lambda_2 \cdot t} + c_2 \right] = \\ &= 1 - (c_1 + c_2) + c_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} + c_2 e^{-\lambda_2 \cdot t}. \end{aligned}$$

Обчислимо суму  $(c_1 + c_2)$ . Оскільки  $\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$ , то:

$$\int_0^{\infty} c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} dt + \int_0^{\infty} c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 \cdot t} dt = c_1 + c_2 = 1.$$

Тоді

$$P(t) = c_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} + c_2 e^{-\lambda_2 \cdot t}.$$

2. Знайдемо залежність інтенсивності відмов від наробітку  $t$  по формулі:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)} = \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 \cdot t}}{c_1 e^{-\lambda_1 \cdot t} + c_2 e^{-\lambda_2 \cdot t}}.$$

3. Визначимо середній наробіток до відмови апаратури:

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt = c_1 \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 \cdot t} dt + c_2 \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 \cdot t} dt = \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2}.$$

### *Завдання для самостійної роботи*

*Задача 5.2.6.* Ймовірність безвідмовної роботи автоматичної лінії виготовлення циліндрів автомобільного двигуна протягом 120 годин дорівнює 0,9. Передбачається, що справедливий експоненціальний закон надійності. Необхідно визначити інтенсивність відмов, щільність розподілу відмов лінії для моменту часу  $t=120$  годин, а також середній наробіток до відмови.

*Задача 5.2.7.* Середній наробіток до відмови автоматичної системи управління дорівнює 640 годин. Передбачається, що справедливий експоненціальний закон надійності. Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи протягом 120 годин, щільність розподілу відмов та інтенсивність відмов для наробітку  $t=120$  годин.

*Задача 5.2.8.* Наробіток до відмови виробу підпорядкований нормальному закону з параметрами  $T_0 = 8000$  годин,  $\sigma = 1000$  годин. Необхідно обчислити кількісні характеристики надійності  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$  для  $t=8000$  годин.

*Задача 5.2.9.* Наробіток до відмови приладу підпорядкований закону Релея з параметром  $\sigma_t = 1860$  годин. Необхідно обчислити  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$  для  $t = 1000$  годин і середній наробіток до відмови приладу.

*Задача 5.2.10.* Наробіток до відмови підшипників має закон розподілу Вейбулла з параметрами  $k = 2,6$ ;  $a = 1,65 \cdot 10^{-7}$  1/год. Необхідно обчислити кількісні характеристики надійності  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$  для  $t=150$  годин та середній наробіток до відмови підшипників.

*Задача 5.2.11.* Ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом  $t = 1000$  годин  $P(1000)=0,95$ . Наробіток до відмови підпорядкований закону Релея. Необхідно визначити кількісні характеристики надійності  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$ ,  $T_0$ .

*Задача 5.2.12.* Середній наробіток до відмови виробу дорівнює 1260 годин. Наробіток підпорядкований закону розподілу Релея. Необхідно знайти кількісні характеристики надійності виробу  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $f(t)$  для  $t=1000$  годин.

*Задача 5.2.13.* В результаті аналізу даних про відмови виробу встановлено, що щільність розподілу відмов має вигляд  $f(t) = 2e^{-\lambda t} \cdot (1 - e^{-\lambda t})$ . Необхідно знайти  $P(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_0$ .

*Задача 5.2.14.* В результаті аналізу даних про відмови виробів встановлено, що ймовірність безвідмовної роботи виражається формулою  $p(t) = 3e^{-\lambda t} - 3e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t}$ . Необхідно знайти характеристики надійності  $f(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $T_0$ .

*Задача 5.2.15.* Визначити ймовірність безвідмовної роботи та інтенсивність відмов приладу при  $t=1300$  годин роботи, якщо при випробуваннях отримано значення середнього наробітку до відмови  $T_0=1500$  годин та середньоквадратичне відхилення  $\sigma = 100$  годин.



### 5.3. Визначення показників надійності основної системи

#### Задача 5.3.1.

Система складається з трьох пристроїв. Інтенсивність відмови електронного пристрою дорівнює  $\lambda_1 = 0,16 \cdot 10^{-3}$  1/год. і є постійною. Інтенсивності відмов двох електромеханічних пристроїв залежать від часу і визначаються наступними виразами:

$$\lambda_2 = 0,23 \cdot 10^{-4} t \text{ 1/год.}, \quad \lambda_3 = 0,06 \cdot 10^{-6} t^{2,6} \text{ 1/год.}$$

Необхідно розрахувати ймовірність безвідмовної роботи системи протягом 100 годин.

*Розв'язок.*

Використовуючи рівняння зв'язку показників надійності запишемо:

$$P_s(t) = \exp \left( - \sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt \right) = \exp \left\{ - \left( \int_0^t \lambda_1 dt + \int_0^t \lambda_2 dt + \int_0^t \lambda_3 dt \right) \right\} = \\ \exp \left[ - \left( \lambda_1 t + 0,23 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{t^2}{2} + 0,06 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{t^{3,6}}{3,6} \right) \right].$$

Для  $t=100$  годин:

$$P_s(100) = \exp \left[ - \left( 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 100 + 0,23 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{100^2}{2} + 0,06 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{100^{3,6}}{3,6} \right) \right] \approx 0,33$$

#### Задача 5.3.2.

Система складається з трьох блоків, середній наробіток до відмови яких дорівнює:  $T_{01} = 160$  годин;  $T_{02} = 320$  годин;  $T_{03} = 600$  годин.

Для блоків справедливий експоненціальний закон надійності. Необхідно визначити середній наробіток до відмови системи.

*Розв'язок.*

Визначимо інтенсивності відмов для кожного блоку:

$$\lambda_1 = \frac{1}{T_{01}} = \frac{1}{160}; \quad \lambda_2 = \frac{1}{T_{02}} = \frac{1}{320}; \quad \lambda_3 = \frac{1}{T_{03}} = \frac{1}{600}.$$

$\lambda_i$  – інтенсивність відмови  $i$ -го блоку. Інтенсивність відмови системи має наступний вигляд:

$$\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \frac{1}{160} + \frac{1}{320} + \frac{1}{600} \approx 0,011 \text{ 1/год.}$$

Обчислимо середній наробіток до відмови системи:

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{0,011} \approx 91 \text{ год.}$$

### Задача 5.3.3.

Система складається з 12600 елементів, середня інтенсивність відмов яких  $\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6}$  1/год. Необхідно визначити  $P_s(t)$ ,  $Q_s(t)$ ,  $f_s(t)$ ,  $T_{0s}$ , для  $t=50$  годин.

$P_s(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи системи протягом  $t$ ;

$Q_s(t)$  – ймовірність відмови системи протягом  $t$ ;

$f_s(t)$  – щільність розподілу відмов системи;

$T_{0s}$  – середній наробіток до відмови системи.

*Розв'язок.*

Інтенсивність відмов системи має вигляд:

$$\lambda_c = \lambda_{\bar{np}} \cdot n = 0,32 \cdot 10^{-6} \cdot 12600 = 4,032 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

Тоді:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_s t}; \quad P_s(50) = e^{-4,032 \cdot 0,001 \cdot 50} \approx 0,82.$$

$$Q_s(t) = 1 - P_s(t); \quad Q_s(50) = 1 - P_s(50) \approx 0,18.$$

$$f_s(t) = \lambda_s e^{-\lambda_s t} = \lambda_s P_s(t); \quad f_s(50) = 4,032 \cdot 10^{-3} \cdot 0,82 = 3,28 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{4,032 \cdot 10^{-3}} \approx 250 \text{ год.}$$

### Задача 5.3.4.

Система складається з двох пристроїв. Ймовірності безвідмовної роботи кожного з них протягом  $t=100$  годин дорівнюють:  $P_1(100) = 0,95$ ;  $P_2(100) = 0,97$ . Справедливий експоненціальний закон надійності. Необхідно знайти середній наробіток до відмови системи.

*Розв'язок.*

Знайдемо ймовірність безвідмовної роботи системи:

$$P_s(100) = P_1(100) \cdot P_2(100) = 0,95 \cdot 0,97 = 0,92.$$

Знайдемо інтенсивність відмов системи за допомогою виразу:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_s \cdot t};$$

або

$$P_s(100) = 0,92 = e^{-\lambda_s \cdot 100}.$$

Звідси отримаємо:

$$\lambda_s \cdot 100 \approx 0,083 \text{ або } \lambda_s \approx 0,083 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

Тоді:

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{0,83 \cdot 10^{-3}} = 1200 \text{ год.}$$

*Задача 5.3.5.*

Ймовірність безвідмовної роботи одного елемента протягом часу  $t$  дорівнює  $P(t) = 0,9997$ . Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи, що складається з  $n=100$  аналогічних елементів.

*Розв'язок.*

Ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює:

$$P_s(t) = P^n(t) = (0,9997)^{100}.$$

Ймовірність  $P(t)$  близька до одиниці, тому для її обчислення скористаємося наступним підходом:

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - 0,9997 = 0,0003.$$

Тоді:

$$P_s(t) \approx 1 - n \cdot Q(t) = 1 - 100 \cdot 0,0003 = 0,97.$$

*Задача 5.3.6.*

Ймовірність безвідмовної роботи системи протягом часу  $t$  дорівнює  $P_s(t) = 0,95$ . Система складається з  $n=120$  рівнонадійних елементів. Необхідно знайти ймовірність безвідмовної роботи елемента.

*Розв'язок.*

Очевидно, що ймовірність безвідмовної роботи елемента буде дорівнювати:

$$P_i(t) = \sqrt[n]{P_s(t)}.$$

Оскільки  $P_s(t)$  є близькою до одиниці, то обчислення  $P_i(t)$  зручно виконати наступним чином:

$$Q_s(t) = 1 - P_s(t) = 1 - 0,95 = 0,05.$$

Тоді:

$$P_i(t) = \sqrt[n]{P_s(t)} \approx 1 - \frac{Q_s(t)}{n} = 1 - \frac{0,05}{120} = 0,9996.$$

*Задача 5.3.7.*

Система складається з 12600 елементів, середня інтенсивність відмов яких  $\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6}$  1/год. Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи протягом  $t=50$  годин.

*Розв'язок.*

Інтенсивність відмов системи визначимо наступним чином:

$$\lambda_s = \lambda_{cp} \cdot n = 0,32 \cdot 10^{-6} \cdot 12600 = 4,032 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

Тоді:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_s \cdot t}; \quad P_s(50) = e^{-4,032 \cdot 0,001 \cdot 50} \approx 0,82.$$

*Завдання для самостійної роботи*

*Задача 5.3.8.* Апаратура зв'язку складається з 2000 елементів, середня інтенсивність відмов яких  $\lambda_{cp} = 0,33 \cdot 10^{-5}$  1/год. Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи апаратури протягом  $t=200$  годин і середній наробинок до відмови апаратури.

*Задача 5.3.9.* Основна система складається з 200000 елементів, середня інтенсивність відмов яких  $\lambda_{cp} = 0,2 \cdot 10^{-6}$  1/год. Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи протягом  $t=24$  години і середній наробіток до відмови системи.

*Задача 5.3.10.* Система управління складається з 6000 елементів, середня інтенсивність відмов яких  $\lambda_{cp} = 0,16 \cdot 10^{-6}$  1/год. Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи протягом  $t = 50$  год. і середній наробіток до відмови системи.

*Задача 5.3.11.* Прилад складається з  $n=5$  вузлів. Надійність вузлів характеризується ймовірністю безвідмовної роботи протягом  $t$  і дорівнює:  $P_1(t)=0,98$ ;  $P_2(t)=0,99$ ;  $P_3(t)=0,998$ ;  $P_4(t)=0,975$ ;  $P_5(t)=0,985$ . Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи приладу.

*Задача 5.3.12.* Система складається з п'яти приладів, середній наробіток до відмови яких дорівнює:  $T_{01} = 83$  год.;  $T_{02} = 220$  год.;  $T_{03} = 280$  год.;  $T_{04} = 400$  год.;  $T_{05} = 700$  год. Для приладів справедливий експоненціальний закон надійності. Необхідно знайти середній наробіток до відмови системи.

*Задача 5.3.13.* Прилад складається з п'яти блоків. Ймовірність безвідмовної роботи кожного блоку протягом  $t=50$  год. дорівнює:  $P_1(50)=0,98$ ;  $P_2(50)=0,99$ ;  $P_3(50)=0,998$ ;  $P_4(50)=0,975$ ;  $P_5(50)=0,985$ . Справедливий експоненціальний закон надійності. Необхідно знайти середній наробіток до відмови приладу.

*5.4. Визначення показників надійності системи з навантаженим резервуванням*

*Задача 5.4.1.*

Основна система складається з 10 рівнонадійних елементів, причому середній наробіток до відмови елемента  $T_{0i} = 1000$  годин. Передбачається, що справедливий експоненціальний закон надійності для елементів системи, а основна і резервна системи рівнонадійні. Необхідно знайти середній наробіток до відмови системи  $T_{0s}$ , а також щільність розподілу відмов  $f_s(t)$  і інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$  у момент часу  $t=50$  годин в наступних випадках:

- а) для нерезервованої (основної) системи;
- б) системи з навантаженим резервуванням.

*Розв'язок.*

Розглянемо випадок а).

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i ,$$

де  $\lambda_s$  - інтенсивність відмов системи;

$\lambda_i$  - інтенсивність відмов  $i$ -го елемента;  $n=10$ .

$$\lambda_i = \frac{1}{T_{0i}} = \frac{1}{1000} = 0,001; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad \lambda = \lambda_i;$$

$$\lambda_s = \lambda \cdot n = 0,001 \cdot 10 = 0,01 \text{ 1/год.};$$

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{0,01} = 100 \text{ год.};$$

$$f_s(t) = \lambda_s(t) \cdot P_s(t);$$

$$\lambda_s(50) = \lambda_s; \quad P_s(t) = e^{-\lambda_s \cdot t};$$

$$f_s(50) = \lambda_s \cdot e^{-\lambda_s \cdot t} = 0,01 \cdot e^{-0,01 \cdot 50} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

Розглянемо випадок б):

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_s} \sum_{j=0}^m \frac{1}{1+j}; \quad m=1; \quad T_{0s} = \frac{1}{0,01} \left( 1 + \frac{1}{2} \right) = 150 \text{ год.}$$

В даному випадку  $m$  - кількість резервних елементів системи.

$$P_s(t) = 1 - \left( 1 - e^{-\lambda_0 \cdot t} \right)^{m+1}; \quad \lambda_0 = \lambda_s = 0,01 \text{ 1/год.};$$

$$P_s(t) = 1 - \left( 1 - e^{-\lambda_0 \cdot t} \right)^2 = 2 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t} - e^{-2 \cdot \lambda_0 \cdot t};$$

$$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = 2 \cdot \lambda_0 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t} \cdot \left( 1 - e^{-\lambda_0 \cdot t} \right);$$

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{2 \cdot \lambda_0 \cdot \left( 1 - e^{-\lambda_0 \cdot t} \right)}{2 - e^{-\lambda_0 \cdot t}};$$

$$f_s(50) \approx 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}; \lambda_s(50) \approx 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

*Задача 5.4.2.*

У системі застосовано дублювання каналу управління. Інтенсивність відмов каналу  $\lambda = 10^{-2}$  1/год. Необхідно розрахувати ймовірність безвідмовної роботи системи  $P_s(t)$  при  $t=10$  год., середній наробіток до відмови системи  $T_{0s}$ , а також щільність розподілу відмов  $f_s(t)$  і інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$  системи.

*Розв'язок.*

В даному випадку  $n=1$  (кількість основних елементів);  $\lambda_i = \lambda$ ;  $\lambda_0 = n\lambda = \lambda$ ;  $m=1$  (кількість резервних елементів). Знайдемо ймовірність безвідмовної роботи такої системи:

$$P_s(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda \cdot t}\right)^2;$$

$$P_s(10) = 1 - \left(1 - e^{-0,1}\right)^2.$$

Оскільки  $e^{-0,1} = 0,9048$ , то:

$$P_s(10) = 1 - (1 - 0,9048)^2 = 1 - 0,0952 \approx 1 - 0,01 = 0,99.$$

Визначимо  $T_{0s}$ :

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^1 \frac{1}{1+i} = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2}\right) = 150 \text{ год.}$$

Визначимо частоту відмов  $f_s(t)$ :

$$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = 2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t}).$$

Визначимо інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$ :

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} (1 - e^{-\lambda \cdot t})}{e^{-\lambda \cdot t} (2 - e^{-\lambda \cdot t})} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot t})}{2 - e^{-\lambda \cdot t}}.$$

### Задача 5.4.3.

Нерезервована система управління складається з  $n=5000$  елементів. Для підвищення надійності системи передбачається провести її загальне дублювання. Щоб наближено оцінити можливість досягнення заданої ймовірності безвідмовної роботи системи  $P_s(t) \geq 0,9$  при  $t=10$  годин, необхідно розрахувати середню інтенсивність відмов одного елемента при припущенні відсутності післядії відмов.

*Розв'язок.*

Ймовірність безвідмовної роботи системи при загальному дублюванні і рівнонадійних елементах дорівнює:

$$P_s(t) = 1 - \left(1 - e^{-\lambda \cdot n \cdot t}\right)^2;$$

або

$$P_s(t) = 1 - \left(1 - P^n(t)\right)^2;$$

де

$$P(t) = e^{-\lambda \cdot t};$$

$P(t)$  - ймовірність безвідмовної роботи одного елемента.

Оскільки повинна виконуватись умова

$$1 - \left(1 - P^n(t)\right)^2 \geq 0,9;$$

то

$$P(t) \geq \left(1 - \sqrt{0,1}\right)^{\frac{1}{n}};$$

Розклавши  $\left(1 - \sqrt{0,1}\right)^{\frac{1}{n}}$  по ступеню  $\frac{1}{n}$  в ряд, при цьому нехтуючи членами ряду вищого порядку меншості, одержимо:

$$\left(1 - \sqrt{0,1}\right)^{\frac{1}{5000}} \approx 1 - \frac{1}{5000} \cdot \sqrt{0,1} = 1 - 6,32 \cdot 10^{-5}.$$



Враховуючи, що  $P(t) = e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t$ , отримаємо:

$$1 - \lambda t \geq 1 - 6,32 \cdot 10^{-5} ;$$

або

$$\lambda \leq (6,32 \cdot 10^{-5}) / t = (6,32 \cdot 10^{-5}) / 10 = 6,32 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год.}$$

#### *Завдання для самостійної роботи*

*Задача 5.4.4.* Приймач складається з трьох блоків. Інтенсивності відмов цих блоків відповідно дорівнюють:  $\lambda_1 = 4 \cdot 10^{-4}$  1/год.;  $\lambda_2 = 2,5 \cdot 10^{-4}$  1/год.;  $\lambda_3 = 3 \cdot 10^{-4}$  1/год. Необхідно розрахувати ймовірність безвідмовної роботи приймача за час  $t=100$  годин для наступних випадків:

- а) резерв відсутній;
- б) є загальне дублювання приймача в цілому.

*Задача 4.4.5.* У радіопередавачі, що складається з трьох рівнонадійних каскадів ( $n=3$ ) застосовано загальне постійне дублювання всього радіопередавача. Інтенсивність відмов каскаду дорівнює  $\lambda = 5 \cdot 10^{-4}$  1/год. Визначити  $P_s(t)$ ,  $\lambda_s(t)$ ,  $f_s(t)$ ,  $T_{0s}$  радіопередавача з дублюванням.

*Задача 4.4.6.* Радіоелектронна апаратура складається з трьох блоків. Інтенсивності відмов цих трьох блоків, відповідно, дорівнюють:  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ . Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи апаратури  $P_s(t)$  для наступних випадків:

- а) резерв відсутній;
- б) є дублювання радіоелектронної апаратури в цілому.

*Задача 5.4.7.* Нерезервована система управління складається з  $n=4000$  елементів. Відома потрібна ймовірність безвідмовної роботи системи  $P_s(t) = 0,9$  при  $t=100$  годин. Необхідно розрахувати припустиму середню інтенсивність відмов одного елемента, вважаючи елементи рівнонадійними, в наступних випадках:

- а) резервування відсутнє;
- б) застосовано загальне дублювання.

*Задача 5.4.8.* Пристрій обробки складається з трьох однакових блоків. Ймовірність безвідмовної роботи пристрою  $P_s(t_i)$  в інтервалі  $(0; t_i)$  повинна бути не менше 0,9. Необхідно визначити потрібну ймовірність безвідмовної роботи кожного блоку в інтервалі  $(0; t_i)$  для наступних випадків:

- а) резерв відсутній;
- б) є загальне резервування всього пристрою в цілому;
- в) є роздільне резервування кожного блоку.

*5.5. Визначення показників надійності системи з ненавантаженим та полегшеним резервуванням*

*Задача 5.5.1.*

Основна система складається з 10 рівнонадійних елементів, причому середній наробіток до відмови елемента  $T_0 = 1000$  год. Передбачається, що справедливий експоненціальний закон надійності для елементів системи, а основна і резервна системи також рівнонадійні. Необхідно знайти ймовірність безвідмовної роботи системи  $P_s(t)$ , середній наробіток до відмови системи  $T_{0s}$ , щільність розподілу відмов  $f_s(t)$  та інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$  у момент часу  $t = 50$  годин для:

- а) нерезервованої системи;
- б) системи з ненавантаженим резервом.

*Розв'язок.*

Розглянемо випадок а). Інтенсивність відмов основної системи має вигляд:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i;$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність відмов  $i$ -го елемента;  $n=10$ .

$$\lambda_i = \frac{1}{T_{0i}} = \frac{1}{1000} = 0,001; \quad i = 1, \dots, n; \quad \lambda = \lambda_i;$$

$$\lambda_s = \lambda n = 0,001 \cdot 10 = 0,01 \text{ 1/год.};$$

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_s} = 100 \text{ год.};$$

$$P_s(t) = e^{-\lambda_s \cdot t};$$

$$f_s(t) = \lambda_s(t) p_s(t); \quad \lambda_s(50) = \lambda_s;$$

$$f_s(50) = \lambda_s e^{-\lambda_s \cdot t} = 0,01 e^{-0,01 \cdot 50} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

Розглянемо випадок б):

$$T_{0s} = \frac{m+1}{\lambda_c}; \quad m=1 \text{ (кількість резервних елементів);}$$

$$T_{0s} = \frac{2}{0,01} = 200 \text{ год.}$$

Визначаємо  $P_s(t)$  по формулі:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 \cdot t} (1 + \lambda_0 t).$$

Оскільки  $\lambda_0 = \lambda_s$ , то:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_s \cdot t} (1 + \lambda_s t).$$

Визначаємо  $f_s(t)$ :

$$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = -\left[ \lambda_s e^{-\lambda_s \cdot t} (1 + \lambda_s t) + \lambda_s e^{-\lambda_s \cdot t} \right] = \lambda_s^2 \cdot t \cdot e^{-\lambda_s \cdot t}.$$

Інтенсивність відмов системи з навантаженим резервуванням має вигляд:

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{\lambda_s^2 \cdot t \cdot e^{-\lambda_s \cdot t}}{e^{-\lambda_s \cdot t} (1 + \lambda_s \cdot t)} = \frac{\lambda_s^2 \cdot t}{(1 + \lambda_s \cdot t)}.$$

Таким чином, за одержаними виразами можна обчислити показники надійності системи з навантаженим резервуванням на момент наробітку  $t = 50$  год.:

$$P_s(50) = e^{-0,01 \cdot 50} (1 + 0,01 \cdot 50) = e^{-0,5} \cdot 1,5 = 0,6065 \cdot 1,5 \approx 0,91;$$

$$f_s(50) = 0,01^2 \cdot 50 \cdot e^{-0,01 \cdot 50} = e^{-0,5} \cdot 0,005 \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.,}$$

$$\lambda_s(50) = \frac{f_s(50)}{p_s(50)} = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{0,91} \approx 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ 1/год.}$$

### Задача 5.5.2.

Радіопередавач має інтенсивність відмов  $\lambda_0 = 0.4 \cdot 10^{-3}$  1/год. Його дублює аналогічний передавач, що знаходиться до відмови основного передавача в режимі очікування (у режимі полегшеного резерву). У цьому режимі інтенсивність відмов передавача  $\lambda_1 = 0.06 \cdot 10^{-3}$  1/год. Необхідно обчислити ймовірність безвідмовної роботи такої системи протягом часу  $t=100$  годин, а також середній наробіток до відмови  $T_{0s}$ , щільність розподілу відмов  $f_s(t)$  та інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$ .

*Розв'язок.*

В даному випадку кратність резервування  $m=1$ . Запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи системи з полегшеним резервуванням:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[ 1 + \sum_{i=1}^m \frac{a_i}{i!} (1 - e^{-\lambda_1 t})^i \right] = e^{-\lambda_0 t} \left[ 1 + a_1 (1 - e^{-\lambda_1 t}) \right];$$

$$a_i = \prod_{j=0}^{i-1} \left( j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right); \quad a_1 = \prod_{j=0}^0 \left( j + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right) = \frac{\lambda_0}{\lambda_1}.$$

Тоді

$$P_s(t) = e^{-\lambda_0 t} \left[ 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{\lambda_0}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right].$$

Підставляючи задані значення наробітку та інтенсивності відмов елементів системи одержимо:

$$\begin{aligned} P_s(100) &= e^{-0,4 \cdot 10^{-3} \cdot 100} \left[ 1 + \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,06 \cdot 10^{-3}} - \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,06 \cdot 10^{-3}} e^{-0,06 \cdot 10^{-3} \cdot 100} \right] = \\ &= e^{-0,04} \left[ 1 + \frac{40}{6} - \frac{40}{6} e^{-0,006} \right] \approx 0,96 [1 + 6,67 - 6,67 \cdot (1 - 0,006)] = 0,998. \end{aligned}$$

Визначимо  $T_{0s}$ :

$$T_{0s} = \frac{1}{\lambda_0} \sum_{i=0}^1 \frac{1}{1 + i \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} = \frac{1}{\lambda_0} \left( 1 + \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_0}} \right) = \frac{1}{\lambda_0} \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1 + \lambda_0} \right) =$$

$$= \frac{1}{0,4 \cdot 10^{-3}} \left( 1 + \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,46 \cdot 10^{-3}} \right) = 4668 \text{ } \tilde{a} \text{ } \ddot{a}.$$

Визначимо  $f_s(t)$ :

$$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = -\left[ -\lambda_0 e^{-\lambda_0 t} \left( 1 + \frac{\lambda_0}{\lambda_1} - \frac{\lambda_0}{\lambda_1} e^{-\lambda_1 t} \right) + e^{-\lambda_0 t} \lambda_0 e^{-\lambda_1 t} \right] =$$

$$= \lambda_0 e^{-\lambda_0 t} \left[ 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_0} - \frac{\lambda_1}{\lambda_0} e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_1 t} \right] = \lambda_0 \frac{\lambda_1 + \lambda_0}{\lambda_1} e^{-\lambda_0 t} (1 - e^{-\lambda_1 t}).$$

Перепишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи системи у вигляді:

$$P_s(t) = \frac{\lambda_1 + \lambda_0}{\lambda_1} e^{-\lambda_0 t} \left[ 1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_1 + \lambda_0} e^{-\lambda_1 t} \right].$$

Тоді:

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{\lambda_0 (1 - e^{-\lambda_1 t})}{1 - \frac{\lambda_0}{\lambda_1 + \lambda_0} e^{-\lambda_1 t}}.$$

Підставляючи значення наробітку та інтенсивності відмов елементів системи можна отримати значення  $f_s(t)$  і  $\lambda_s(t)$ .

### Задача 5.5.3.

Ймовірність безвідмовної роботи перетворювача постійного струму в змінний протягом  $t=1000$  годин дорівнює  $0,95$ , тобто  $P(1000) = 0,95$ . Для підвищення надійності системи електропостачання на об'єкті є аналогічний перетворювач, який включається в роботу при відмові першого (режим ненавантаженого резерву). Необхідно розрахувати ймовірність безвідмовної роботи і середній наробіток до відмови системи, що складається з двох перетворювачів, а також визначити щільність розподілу відмов  $f_s(t)$  та інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$  системи.

*Розв'язок.*

В даному випадку кратність резервування  $m=1$ . Запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи системи з ненавантаженим резервуванням:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 \cdot t} (1 + \lambda_0 t).$$

Оскільки для окремого перетворювача має місце експоненціальний закон надійності, то

$$P(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t};$$

де  $P(t)$  – ймовірність безвідмовної роботи перетворювача;  $\lambda_0$  – інтенсивність відмов перетворювача в робочому стані. Тоді:

$$P(1000) = e^{-\lambda_0 \cdot 1000} = 0,95;$$

$$\lambda_0 \cdot 1000 = 0,051;$$

$$\lambda_0 = 0,051 / 1000 = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год.}$$

Таким чином:

$$P_s(1000) = 0,95(1 + 0,05) = 0,9975.$$

Визначимо  $T_{0s}$ :

$$T_{0s} = \frac{m+1}{\lambda_0} = \frac{2}{0,5 \cdot 10^{-4}} = 40000 \text{ год.}$$

Відзначимо, що середній наробіток до відмови нерезервованого перетворювача дорівнює

$$T_{0s} = 1 / \lambda_0 = 20000 \text{ годин.}$$

Визначимо щільність розподілу відмов системи з ненавантаженим резервуванням:

$$f_s(t) = \frac{\lambda_0^2}{1!} t e^{-\lambda_0 \cdot t} = \lambda_0^2 t e^{-\lambda_0 \cdot t}.$$

$\lambda_s(t)$  можна обчислити за допомогою наступного виразу:

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{\lambda_0^2 t \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t}}{e^{-\lambda_0 \cdot t} (1 + \lambda_0 \cdot t)} = \frac{\lambda_0^2 t}{1 + \lambda_0 \cdot t}.$$

#### *Завдання для самостійної роботи*

*Задача 5.5.4.* Пристрій складається з одного працюючого передавача ( $\lambda = 8 \cdot 10^{-3}$  1/год.) і одного передавача в стані полегшеного резерву ( $\lambda_0 = 8 \cdot 10^{-4}$  1/год.). Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи пристрою  $P_s(t)$  при  $t = 20$  год. та середній наробіток до відмови пристрою  $T_{0s}$ .

*Задача 5.5.5.* У радіопередавальному каналі системи зв'язку використовується основний передавач П1, а також два передавача П2 і П3, що знаходяться в ненавантаженому резерві. Інтенсивність відмов основного працюючого передавача дорівнює  $\lambda_0 = 10^{-3}$  1/год. З моменту відмови передавача П1 у роботу включається П2, після відмови передавача П2 включається П3. При включенні резервного передавача в роботу його інтенсивність відмов стає рівною  $\lambda_0$ . Вважаючи перемикач абсолютно надійним, визначити ймовірність безвідмовної роботи  $P_s(t)$  радіопередавального каналу при  $t = 100$  год. та середній наробіток до відмови  $T_{0s}$  каналу.

*Задача 5.5.6.* Пристрій складається з двох логічних блоків. Середній наробіток до відмови цих блоків однаковий і для кожного з них дорівнює  $T_0 = 200$  годин. Необхідно визначити середній наробіток до відмови пристрою  $T_{0s}$  для двох випадків:

- а) є ненавантажений резерв всього пристрою;
- б) є ненавантажений резерв кожного блоку.

#### *5.6. Визначення показників надійності системи з ковзним резервуванням*

##### *Задача 5.6.1.*

Основна система складається з двох однакових елементів. Для підвищення її надійності конструктор запропонував ковзне резервування з одним резервним елементом, що знаходиться в ненавантаженому стані. Інтенсивність відмов елементу основної системи дорівнює  $\lambda$ . Необхідно знайти ймовірність безвідмовної роботи  $P_s(t)$  резервованої системи, середній наробіток до відмови  $T_{0s}$  системи, а також щільність розподілу відмов  $f_s(t)$  та інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$  резервованої системи.

*Розв'язок.*

В даному випадку  $n = 2$  (кількість елементів основної системи);  $m_0 = 1$  (кількість резервних елементів);  $\lambda_0 = \lambda n = 2\lambda$  (інтенсивність відмов основної системи).

Знайдемо ймовірність безвідмовної роботи системи з ковзним резервом:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^{m_0} \frac{(\lambda_0 \cdot t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 \cdot t} (1 + \lambda_0 \cdot t);$$

або

$$P_s(t) = e^{-2\lambda \cdot t} (1 + 2\lambda t).$$

Визначимо  $T_{0s}$ :

$$T_{0s} = T_0(m_0 + 1); T_0 = \frac{1}{\lambda_0};$$

або

$$T_{0s} = \frac{1}{2\lambda} \cdot 2 = \frac{1}{\lambda}.$$

Визначимо щільність розподілу відмов системи з ковзним резервуванням:

$$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = -\left[-2 \cdot \lambda \cdot e^{-2\lambda t} (1 + 2 \cdot \lambda \cdot t) + 2 \cdot \lambda \cdot e^{-2\lambda t}\right];$$

або

$$f_s(t) = 4\lambda^2 \cdot t \cdot e^{-2\lambda t}.$$

Визначимо інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$ :

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{4\lambda^2 \cdot t}{1 + 2 \cdot \lambda \cdot t}.$$



### Задача 5.6.2.

Основна система складається з 1024 однотипних елементів, з'єднаних послідовно, і сконструйована так, що є можливість замінити будь-який з елементів, що відмовив. У запасі є 3 елементи, кожен з яких може замінити будь-який елемент, що відмовив (ковзне резервування). Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи з ковзним резервуванням  $P_s(t)$  при  $t = 10000$  годин, середній наробіток до відмови  $T_{0s}$ , а також щільність розподілу відмов  $f_s(t)$  та інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$  резервованої системи. Відомо, що інтенсивність відмов елементів основної системи  $\lambda = 0,12 \cdot 10^{-6}$  1/год.

*Розв'язок.*

Оскільки будь-який елемент, що є в запасі може замінити будь-який елемент основної системи, то має місце ковзне резервування. У нашому випадку кількість елементів основної системи  $n = 1024$ , інтенсивність відмов нерезервованої системи дорівнює:

$$\lambda_0 = \lambda n = 1024 \cdot 0,12 \cdot 10^{-6} \approx 1,23 \cdot 10^{-4} \text{ 1/год.}$$

Кількість резервних елементів  $m_0 = 3$ . Запишемо вираз для ймовірності безвідмовної роботи системи з ковзним резервуванням:

$$P_s(t) = e^{-\lambda_0 \cdot t} \cdot \sum_{i=0}^3 \frac{(\lambda_0 \cdot t)^i}{i!} = e^{-\lambda_0 \cdot t} \left( 1 + \lambda_0 \cdot t + \frac{\lambda_0^2 \cdot t^2}{2} + \frac{\lambda_0^3 \cdot t^3}{6} \right).$$

Визначимо  $T_{0s}$ :

$$T_{0s} = T_0(m_0 + 1); T_0 = \frac{1}{\lambda_0};$$

або

$$T_{0s} = \frac{1}{1,23 \cdot 10^{-4}} \cdot (3 + 1) \approx 32500 \text{ год.}$$

Визначимо щільність розподілу відмов системи з ковзним резервуванням:

$$f_s(t) = -\frac{dP_s(t)}{dt} = \frac{1}{6} \cdot \lambda_0^4 \cdot t^3 \cdot e^{-\lambda_0 \cdot t}.$$

Визначимо інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$ :

$$\lambda_s(t) = \frac{f_s(t)}{P_s(t)} = \frac{1}{6} \cdot \frac{\lambda^4 \cdot t^3}{1 + \lambda_0 \cdot t + \frac{\lambda_0^2 \cdot t^2}{2} + \frac{\lambda_0^3 \cdot t^3}{6}}$$

Визначимо  $P_s(t)$  при  $t = 10000$  годин:

$$P_s(10000) = e^{-1,23 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4} \left( 1 + 1,23 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4 + \frac{(1,23 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4)^2}{2} + \frac{(1,23 \cdot 10^{-4} \cdot 10^4)^3}{6} \right) \approx 0,96.$$

### Завдання для самостійної роботи

**Задача 5.6.3.** Система складається з 1024 стандартних елементів. У запасі є ще два однотипні елементи, які можуть замінити будь-який з тих, що відмовив. Відомо, що інтенсивність відмов елементів є величиною постійною, а середній наробіток до відмови системи з урахуванням двох запасних елементів  $T_{0s} = 60$  годин. Передбачається, що система допускає коротку перерву в роботі на час заміни елементів, що відмовили. Необхідно визначити середній наробіток до відмови одного елементу  $T_0 = T_{0i}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 1024$ . Також визначити ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи  $P_s(t)$ , щільність розподілу відмов  $f_s(t)$ , інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$  резервованої системи.

**Задача 5.6.4.** Система складається з  $n$  однотипних елементів, кожен з яких має середній наробіток до відмови  $T_{0i} = T_0 = 1/\lambda$ ,  $i = \overline{1, n}$ . Для підвищення надійності застосовано ковзне резервування, при якому  $m_0$  резервних елементів знаходяться в ненавантаженому режимі. Необхідно знайти середній наробіток до відмови резервованої системи  $T_{0s}$ . Визначити ймовірність безвідмовної роботи резервованої системи  $P_s(t)$ , якщо  $m_0 = 2$ , а також щільність розподілу відмов  $f_s(t)$ , інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$  резервованої системи.

**Задача 5.6.5.** Блок підсилювачів промислової частоти включає  $n=4$  послідовно сполучених підсилювача і один підсилювач в резерві (використовується ковзне резервування). Інтенсивність відмов кожного працюючого підсилювача  $\lambda = 6 \cdot 10^{-4}$  1/год. Визначити ймовірність безвідмовної роботи  $P_s(t)$  резервованої системи, середній наробіток до відмови  $T_{0s}$  системи, щільність

розподілу відмов  $f_s(t)$ , інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$ . Визначити також  $P_s(t)$  при  $t=100$  годин.

*Задача 5.6.6.* Основна система включає два однакових елементи. Інтенсивність відмов кожного елемента складає  $\lambda = 4 \cdot 10^{-4}$  1/год. Є один резервний елемент (ковзний резерв). Визначити ймовірність безвідмовної роботи  $P_s(t)$  резервованої системи, середній наробіток до відмови  $T_{0s}$  системи, щільність розподілу відмов  $f_s(t)$ , інтенсивність відмов  $\lambda_s(t)$ . Визначити також  $P_s(t)$  при  $t=250$  годин. Визначити  $P_s(t)$ , коли резерв відсутній.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кодекс цивільного захисту України від 2 жовтня 2012 року № 5403-VI // Голос України. – 2012. – листопад (№ 220(5470)). – С. 4–20.

2. Постанова Кабінет Міністрів України від 24 березня 2004 р. № 368 «Порядку класифікації надзвичайних ситуацій за їх рівнями» [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/368-2004-%D0%BF#Text>

3. Державний класифікатор надзвичайних ситуацій ДК 019:2010. Прийнято та надано чинності Наказом Держспоживстандарту України від 11 жовтня 2010 року № 457 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va457609-10#Text>

4. «Класифікаційні ознаки надзвичайних ситуацій» затверджено наказом МВС України від 06 серпня 2018 року № 658 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0969-18#Text>

5. Закон України «Про захист населення і територій від надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» від 8 червня 2000 року № 1809-III [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1809-14>

6. Закон України «Про гідрометеорологічну діяльність» від 18 лютого 1999 року № 443-XIV [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/443-14>

7. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» від 8 лютого 1995 року № 39/95-ВР [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text>

8. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 18 січня 2001 року № 2245-III [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text>

9. «Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті» затверджено наказом МВС України від 29 листопада 2019 року № 1000 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text>

10. Постанова Кабінету Міністрів України від 26 січня 2015 року № 18 «Про Державну комісію з питань техногенно-екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/18-2015-%D0%BF>

11. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://undicz.dsns.gov.ua/ua/Nacionalna-dopovid-pro-stan-tehnogennoyi-ta-prirodnoyi-bezpeki-v-Ukrayini.html>

12. Биченок М.М. Проблеми природно-техногенної безпеки в Україні / М.М. Биченок, О.М. Трофимчук. – К.: РНБОУ, 2002. – 153 с.

13. Бондур В.Г. Природные катастрофы и окружающая среда / В.Г. Бондур, В.Ф. Крапивин, И.И. Потапов, В.Ю. Солдатов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2012. – №1. – С. 3 – 150
14. Аверьянов А.Н. О природе взаимодействия / А.Н. Аверьянов – М.: Знание, 1984. – 63 с.
15. Черногор Л.Ф. О нелинейности в природе и науке: Монография / Л.Ф. Черногор – Харьков: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2008. – 528 с.
16. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф / Л.Ф. Черногор – Харьков: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2012. – 556 с.
17. Михайлюк О.П. Ідентифікація об'єктів підвищеної небезпеки / О.П. Михайлюк, В.В. Олійник, А.О. Михайлик. – Харків: Університет цивільного захисту України, 2007. – 190 с.
18. Андронов В.А. Природні та техногенні загрози, оцінювання небезпек / В.А. Андронов, А.С. Рогозін, О.М. Соболев, В.В. Тютюник, Р.І. Шевченко – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2011. – 264 с.
19. Азімов О.Т. Огляд поточного стану природно-техногенної безпеки в Україні та перспективи розвитку аналітичної інтерактивної системи моніторингу надзвичайних ситуацій засобами дистанційних, телематичних та ГІС-технологій / О.Т. Азімов, П.А. Коротинський, Ю.Ю. Колесніченко // ГЕОІН-ФОРМАТИКА – 2006. – № 4. – С. 52–66.
20. Кузнецов И.В. К проблеме классификации катастроф: параметризация воздействий и ущерб / И.В. Кузнецов, В.Ф. Писаренко, М.В. Родкин // Геоэкология. – 1998. – Т.1. – С. 16–29.
21. Родкин М.В. Фундаментальные проблемы мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф / М.В. Родкин, В.И. Мухин // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – Химки: ФГБОУ ВПО «АГЗ МЧС России», 2010. – № 1. – С. 9 – 14.
22. Черногор Л.Ф. Эффективность мониторинга катастрофических процессов космического и земного происхождения / Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 38 – 47.
23. Вишняков Я.Д. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций и антикризисное управление / Я.Д. Вишняков, К.А. Кирсанов, С.Г. Васин, Ю.А. Буковская // Проблемы безопасности при ЧС. – 2004. – № 2. – С. 38–47.
24. Михалевська Т.В. Моделювання і прогнозування стану довкілля / Т.В. Михалевська, В.М. Ісаєнко, В.М. Криворотько, В.А. Гроза – К.: НАУ, 2006. – 212 с.
25. Ісаєнко В.М. Моніторинг і методи вимірювання параметрів навколишнього середовища / В.М. Ісаєнко, Г.В. Лисиченко, Т.В. Дудар, Г.М. Франчук, Є.М. Варламов. – К.: Вид-во Нац. авіа. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 312 с.

26. Тютюник В.В. Системний підхід до оцінки небезпеки життєдіяльності при територіально часовому розподілі енергії джерел надзвичайних ситуацій / В.В. Тютюник, Л.Ф. Черногор, В.Д. Калугін // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2011. – Вип. 14. – С. 171–194.

27. Тютюник В.В. Дослідження умов раннього моніторингу та попередження надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру: звіт про НДР (№ держреєстрації 0112U002587) / керівник роботи: В.В. Тютюник; виконавці: В.Д. Калугін, Б.Б. Поспелов, Р.І. Шевченко, М.В. Кустов, С.С. Говаленков – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2014. – 266 с.

28. Тютюник В.В. Оцінка відносної інтенсивності між надзвичайними ситуаціями природного та техногенного характеру в регіонах України / В.В. Тютюник // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2015. – Вип. 21. – С. 112–120.

29. Тютюник В.В. Аналіз факторів, які провокують виникнення надзвичайних ситуацій природного характеру / В.В. Тютюник, В.Д. Калугін // Системи обробки інформації. – Харків: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2011. – Вип. 4(94). – С. 280–284.

30. Андронов В.А. Науково-конструкторські основи створення комплексної системи моніторингу надзвичайних ситуацій в Україні: Монографія / В.А. Андронов, М.М. Дівізінюк, В.Д. Калугін, В.В. Тютюник. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2016. – 319 с.

31. Тютюник В.В. Оцінка умов створення у Єдиній державній системі цивільного захисту інформаційно-аналітичної підсистеми управління процесами попередження й локалізації наслідків надзвичайних ситуацій на основі аналізу динаміки прояву небезпек на території України / В.В. Тютюник, В.Д. Калугін, О.О. Писклакова // Комунальне господарство міст. – Харків: Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, 2019. – т. 1. – №147. – С. 66–82.

32. Тютюник В.В. Розробка шляхів удосконалення моніторингу та прогнозування сейсмічної небезпеки локальної території земної кулі: звіт про НДР (№ держреєстрації 0118U001010) / керівник роботи: В.В. Тютюник; виконавці: Т.Х. Агазаде В.Д. Калугін, О.М. Соболев, О.А. Левтеров, М.В. Кустов. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2020. – 98 с.

33. Левчук К.О. Цивільний захист: навчальний посібник / К.О. Левчук, Р.Я. Романюк, А.О. Толоч. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2016. – 325 с.

34. Рокочинський А.М. Інженерний захист територій: Навч. посібник / А.М. Рокочинський, В.А. Живиця, Л.А. Волкова, М.І. Ромащенко [та ін]; за ред. А.М. Рокочинського, Л.А. Волкової, В.А. Живиці, В.П. Чіпака – Херсон: ОЛДІ ПЛЮС, 2017. – 414 с.

35. Белов П.Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере / П.Г. Белов. – М.: Академия, 2003. – 506 с.

36. Беляев Н.Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций / Н.Н. Беляев, Е.Ю. Гунько, П.Б. Машихина. – Днепропетровск; Акцент ПП, 2013. – 158 с.
37. Гражданкин А.И. Использование вероятностных оценок при анализе безопасности опасных производственных объектов / А.И. Гражданкин, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 2. – С. 12–20.
38. Лепихин А.М. Комплексные показатели безопасности территорий / А.М. Лепихин // Проблемы безопасности и ЧС. – 2008. – № 5. – С. 93–98.
39. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.
40. Бондарь В.А. Риск, надежность и безопасность. Система понятий и обозначений / В.А. Бондарь, Ю.П. Попов // Безопасность труда в промышленности. – 1997. – № 10. – С. 39–42.
41. Бестужев-Лада И.В. Рабочая книга по прогнозированию / И.В. Бестужев-Лада, С.А. Саркисян, Э.С. Минав и др. – М.: Мысль, 1982. – 426 с.
42. Лисичкин В.А. Теория и практика прогностики. – М.: Дело, 1998. – 816 с.
43. Боровков Л.Л. Математическая статистика. – М.: Наука, 1984. – 476 с.
44. Хенк Д.Э., Уичерн Д.У., Райтс А.Дж. Бизнес-прогнозирование: – М.: Изд. Дом «Вильямс», 2003. – 656 с.
45. Вентцель Е.С. Вероятностное прогнозирование деятельности человека. – М.: Наука, 1977. – 267 с.
46. Крянев А.В. Математические методы обработки неопределенных данных. – М.: Физматлит, 2003. – 216 с.
47. Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ. – М.: Дело, 1987. – 239 с.
48. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.
49. Вентцель Е.С. Исследование операций. – М.: Советское радио, 2001. – 208 с.
50. Халафян А.А. STATISTICA 6. Статистический анализ данных. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512 с.
51. Хенли Э. Дж. Надежность технических систем и оценка риска: Пер. с англ. / Э. Дж. Хенли, Х. Кумамото. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
52. Диллон Б. Инженерные методы обеспечения надежности систем: Пер. с англ. / Б. Диллон, Ч. Сингх. – М.: Мир, 1984. – 318 с.
53. Ветошкин А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск. – Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. – 155 с.
54. Костерев В.В. Надежность технических систем и управление риском / В.В. Костерев // Учебное пособие. – М.: МИФИ, 2008. – 280 с.

55. Гаспер Б.С. Решение задач по курсу "Прикладная теория надежности": учебное пособие / Б.С. Гаспер, И.Н. Липатов. – Пермь: ПГТУ, 1998. – 80 с.

56. Матвеевский В.Р. Надежность технических систем: учебное пособие. – М.: МГИЭМ, 2002. – 113 с.

57. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике / В.Е. Гмурман // Учеб. пособие для студентов вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1979. – 400 с.

58. Брушлинский Н.Н. Снова о рисках и управлении безопасностью / Н.Н. Брушлинский // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 2002. – Вып. 4. – С. 230–234.

59. Алымов В.Т. Техногенный риск: Анализ и оценка / В.Т. Алымов, Н.П. Тарасова. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 118 с.

60. Вишняков Я.Д. Общая теория рисков: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Я.Д. Вишняков, Н.Н. Радаев. – 2-е изд., испр. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 368 с.

61. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 22 січня 2014 р. № 37-р «Про схвалення Концепції управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/37-2014-p>.

62. Постанова Кабінету Міністрів України від 5 вересня 2018 р. № 715 «Про затвердження критеріїв, за якими оцінюється ступінь ризику від провадження господарської діяльності та визначається періодичність здійснення планових заходів державного нагляду (контролю) у сфері техногенної та пожежної безпеки Державною службою з надзвичайних ситуацій» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/715-2018-p>.

63. Kravtsiv S.Ya. Determination of the limits of the application of the statistical method for evaluation integral fire risks / S.Ya Kravtsiv, O.M. Sobol, T.Ya. Samiliv // Проблеми надзвичайних ситуацій. – Харків: НУЦЗУ, 2018. – Вип. 27. – С. 47-51.

64. Кравців С.Я. Мінімізація наслідків надзвичайних ситуацій техногенного характеру шляхом розподілу оперативно-рятувальних підрозділів за рівнем інтегрального ризику: монографія / С.Я. Кравців, О.М. Соболев, В.В. Тютюник. – Харків: Національний університет цивільного захисту України, 2019 – 135 с.

65. Mathematical Model of Management of the Integral Risk of Emergency Situation on the Example of Fires / [Kravtsiv S., Sobol O., Komyak V., Danilin O., Al'boschiy O.] // IFIP Advances in Information and Communication Technology, 2020, 575 IFIP, С. 182–195.

66. Формування динамічної моделі оперативного моніторингу рівня забруднення екосистеми внаслідок аварій на об'єктах ядерної енергетики / [В.В. Тютюник, О.М. Соболев, В.Д. Калугін, Ю.В. Захарченко] // Екологічна безпека та природокористування. – Київ: КНУБА, ІТіГП, 2020, №1(33). – С. 95–114.









Навчальне видання

**Тютюник** Вадим Володимирович  
**Соболь** Олександр Миколайович  
**Тютюник** Ольга Олександрівна  
**Ященко** Олександр Анатолійович

## **ПРИРОДНІ ТА ТЕХНОГЕННІ ЗАГРОЗИ**

### **Підручник**

Підписано до друку 03.10.2023. Формат 60x84/16.  
Папір офсетний 80 г/м<sup>2</sup>. Друк офсетний. Ум. друк. арк. 28,1.  
Тираж 300 прим. Вид. № 42/23. Обл.вид арк. 18,6.  
Сектор редакційно-видавничої діяльності  
Національного університету цивільного захисту України  
61023, м. Харків, вул. Чернишевська, 94

[www.nuczu.edu.ua](http://www.nuczu.edu.ua)



Видавець та виготовлювач ТОВ «Друкарня Мадрид»  
61024, м. Харків, вул. Гуданова, 18  
Свідectво суб'єкта видавничої справи: Серія ДК № 4399 від 27.08.12 р.  
[www.madrid.in.ua](http://www.madrid.in.ua)  
тел:0800336762