

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**БРОВКО Дмитро Вікторович**



**УДК 622.012.01:624.01-047.72:001.94**

**ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД  
ПОВЕРХНЕВОГО КОМПЛЕКСУ ШАХТ В УМОВАХ НЕДОСТАТНЬОЇ  
ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЇХ ТЕХНІЧНИЙ СТАН**

**Спеціальність 05.15.04 - Шахтне та підземне будівництво**

**Автореферат**

**дисертації на здобуття наукового ступеня**

**доктора технічних наук**

**Дніпро – 2019**

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана на кафедрі будівельних геотехнологій Державного вищого навчального закладу «Криворізький національний університет» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**АНДРЕЄВ Борис Миколайович,**  
завідувач кафедри будівельних геотехнологій  
Державного вищого навчального закладу  
«Криворізький національний університет»  
Міністерства освіти і науки України

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ВОЛКОВА Вікторія Євгенівна,**  
професор кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки  
Національного технічного університету  
«Дніпровська політехніка»  
Міністерства освіти і науки України

доктор технічних наук, професор  
**ГАЙКО Геннадій Іванович,**  
професор кафедри геоінженерії  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»  
Міністерства освіти і науки України

доктор технічних наук, доцент  
**ТЮТЬКІН Олексій Леонідович,**  
завідувач кафедри мостів та тунелів  
Дніпровського національного університету залізничного  
транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Міністерства освіти і науки України

Захист дисертації відбудеться «06» грудня 2019 р. о 13<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. (056) 746-22-00.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19).

Автореферат розісланий «06» листопада 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.В. Солодянкін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність проблеми.** Видобуток корисних копалин у найближчому столітті буде відбуватися на глибинах, що наближаються до 2000 метрів. При цьому виникають питання забезпечення тривалої експлуатації виробничих будівель і споруд шахтної поверхні шляхом належного догляду за ними, своєчасного і якісного проведення їх ремонту, а також запобігання виникненню аварійних ситуацій. Завдання підвищення безпеки будівель і споруд на поверхні шахт при накопиченні в їх елементах пошкоджень завжди посідали одне з найважливіших місць у розв'язанні загальної проблеми матеріаломісткості, якості й безпеки будівництва. Основними обставинами виникнення техногенних аварій і катастроф та посилення негативного впливу внаслідок виникнення надзвичайних ситуацій природного й техногенного характеру в Україні є: застарілість основних фондів, недостатня інвестиційна підтримка процесу впровадження новітніх ресурсозберігаючих і екологічно чистих технологій, небажання суб'єктів господарювання здійснювати заходи щодо запобігання аваріям і катастрофам на об'єктах підвищеної небезпеки та потенційно небезпечних об'єктах. Останніми роками в Україні та в інших країнах проблема надійності гірничотехнічних будівель і споруд при пошкодженнях і діях раптового характеру стають в числі найважливіших при проектуванні та експлуатації об'єктів поверхні. Останнім часом усе частіше обговорюються питання, і є окремі пропозиції, спрямовані на оцінювання надійності будівельних конструкцій при раптових діях від таких впливів. Завдання визначення параметрів надійності будівельних конструкцій об'єктів на поверхні шахт дотепер у науковій літературі не обговорювалися, проте їх розв'язання відкриває можливості побудови не тільки теоретичного прогнозування поведінки конструкцій гірничотехнічних будівель і споруд, що експлуатуються в умовах невизначеності, а й мінімізації можливих збитків у випадках аварії.

Розвиток методів аналізу та оптимізації характеристик надійності несучих конструкцій будівель поверхні, що підсилюються й реконструюються, є важливим завданням у розв'язанні загальної проблеми конструктивної безпеки елементів конструкцій при раптових аварійних ситуаціях і синтезу на їх основі адаптаційних конструктивних систем.

Тому розробка теоретичних основ прогнозування й забезпечення стійкості об'єктів поверхні шахт в умовах недостатньої інформації про їх технічний стан, особливо при підсиленні та реконструкції їх елементів на підставі результатів систематизації ефективних сучасних методик, а також нових підходів, критеріїв та закономірностей визначення безпечного залишкового ресурсу, є актуальною науковою проблемою, розв'язання якої дозволить одержати детальну інформацію про поведінку конструкцій, які досліджуються, та визначити способи утримання конструкційної безпеки, що має велике значення для комплексного освоєння підземного простору.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам техногенної безпеки в Ук-

раїні відповідно до Концепції державної програми дослідження стану Криворізького залізорудного басейну для запобігання виникненню на його території катастрофи техногенного та природного характеру на 2013 – 2016 роки, затвердженої Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 6 березня 2013 р. № 178-р.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до тематичного плану НДР Державного ВНЗ «Криворізький національний університет»: ДП «Схід ГЗК» 2007-2011, 2018 (№ держреєстрації (ДР) 0107U010883; 0109U008070-75; 0110U002364; 0110U002370-71; 0111U005576-77; 0118U006516); ПАТ «Півд ГЗК» 2009, 2018 (№ ДР 0109U005393; 0118U006523); ПАТ «Центральний ГЗК» 2009, 2011 (№ ДР 0109U006135; 0111U005579); ПАТ «Півн ГЗК» 2009 (№ ДР 0111U005577); ПАО «СУХА БАЛКА» 2011-2018 (№ ДР 0111U005578; 0112U003960; 0112U003961; 0113U003740; 0113U007658; 0114U003900; 0115U003965; 0116U001871; 0117U001012; 0117U001448; 0118U006517).

**Метою роботи** є розвиток теоретичних основ та методики прогнозування надійності елементів будівель і споруд поверхневого комплексу шахт в умовах недостатньої інформації про їх технічний стан із використанням математичного апарату та імовірісно-статистичних методів технічної діагностики.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано й вирішено такі **основні задачі досліджень**:

- виконати аналіз сучасних уявлень щодо довговічності й надійності будівель і споруд поверхневого комплексу в сучасних дослідженнях і нормах проектування для оцінювання їх довговічності;
- обґрунтувати адекватну фізичну модель для визначення величини дефектів конструкцій промислових об'єктів на поверхні шахт, які призводять до зміни їх довговічності й надійності;
- дослідити кінетику зміни напружено-деформованого стану в елементах конструкцій складних систем поверхні шахт при розвитку дефектів;
- розробити методологію оцінювання та аналізу технічного стану промислових споруд на основі математичного моделювання можливих дефектів;
- визначити розподілення всіх уявлень граничного значення при призначенні тієї чи іншої категорії технічного стану для елементів конструкцій об'єкта на всіх рівнях діагностування;
- розробити модель «регресії надійності об'єкта» введенням необхідних положень теорії інформації, основним з яких є поняття ентропії системи;
- дослідити параметри надійності елементів конструкцій у непередбачених проектом станах від експлуатаційного навантаження й раптового аварійного впливу;
- розробити способи прогнозування та забезпечення надійності елементів будівель і споруд поверхневого комплексу для різних гірничотехнічних умов експлуатації;
- розробити загальну концепцію керування показниками надійності промислових об'єктів на поверхні шахт при недостатній статистичній інформації.

**Об'єктом дослідження** є процеси зміни в часі технічного стану та надійності конструкцій експлуатованих будівель поверхні шахт.

**Предметом дослідження** є стан елементів конструкцій споруд поверхні шахт, що експлуатуються в умовах недостатньої статистичної інформації щодо їх технічного стану.

**Ідея роботи** полягає у використанні ймовірнісно-статистичних моделей для забезпечення безпечної експлуатації будівель поверхні шахт при мінімальному обсязі технічних параметрів стану елементів конструкцій.

**Методи досліджень.** Методичну основу досліджень складає комплексний підхід, що включає аналіз та узагальнення літературних джерел, науково-технічних досягнень і виробничого досвіду з тематики досліджень, натурні інструментальні спостереження, натурні дослідження, виконані із залученням методів комп'ютерного моделювання, аналітичні дослідження з залученням методів будівельної механіки, теорії пружності, стійкості деформованих систем, теорії ймовірностей і математичної статистики, чисельних методів.

#### **Наукові положення, що захищаються в дисертації:**

1. Життєвий цикл будівель і споруд на поверхні шахт складається з періодів, обмежених стрибкоподібною зміною інтенсивності розвитку дефектів  $\delta(t)$ , яка в межах кожного періоду знаходиться в нелінійній залежності від кількості дефектів і тривалості експлуатації, що дозволяє розподілити об'єкти за групами, які відрізняються станом їх експлуатації: при  $\delta(t) < 1$  – задовільний, при  $1 < \delta(t) < 1,5$  – непридатний,  $\delta(t) > 1,5$  – аварійний.

2. Мірою оцінювання надійності елементів будівель і споруд поверхневого комплексу є дивергенція Кульбака-Лейблера  $D_{KL}$ , ймовірність аварійної ситуації зростає при її наближенні до нуля (для копрів  $D_{KL} = 0,47$ , для галерей  $D_{KL} = 0,30$ ), при цьому характеристики дефектів, маючи апріорне розподілення ймовірності актуальних напружень, після надходження інформації набувають апостеріорного розподілення, що дозволяє формувати експлуатаційну надійність як окремих конструктивних елементів, так і всієї системи загалом.

3. В умовах недостатньої інформації про стан елементів конструкцій будівель і споруд поверхневого комплексу при різних впливах рівень надійності знаходиться в нелінійній залежності від ступеня технічного стану елемента і має вигляд сигмоїдальної функції, що дозволяє достовірно визначати порогові рівні технічної діагностики й безпечний залишковий ресурс об'єкта загалом.

4. Граничний рівень безпечної експлуатації об'єктів поверхневого комплексу визначається точкою перетину графіків зміни дивергенції Кульбака-Лейблера та зміни швидкості ентропії й сигналізує про необхідність проведення ремонтно-відновлювальних робіт, за відсутності яких об'єкт переходить у небезпечний стан його експлуатації.

#### **Наукова новизна отриманих результатів досліджень.**

1. Запропоновано прийнятний спосіб подання статистичних даних з урахуванням математичного моделювання можливих дефектів, що істотно розширює мо-

жливості виконання робіт технічного обстеження елементів конструкцій будівель і споруд поверхневого комплексу.

2. Уперше встановлено закономірності появи дефектів і їх розвитку в результаті різного роду процесів накопичення пошкоджень, що при великій кількості елементів конструкцій і застосуванні методів екстремальних порядкових статистик дозволяє встановлювати елементи, відмова яких може призвести до відмови системи загалом.

3. Запропоновано новий підхід до оцінювання поширення дефектів і визначення рівнів результатів діагностування, що дозволяє певним чином модифікувати традиційне, при проведенні обстеження гірничотехнічних будівель і споруд, правило про призначення груп технічного стану об'єкта загалом.

4. Уперше встановлено залежності втрати міцності несучих конструкцій будівлі від величини ентропії, встановлено порогові значення ентропії, при досягненні яких будівля переходить у якісно інший стан, що дозволяє оперативно контролювати порогові значення дефектності.

5. Розроблено нову модель визначення надійності роботи елементів конструкцій об'єктів поверхні в станах, не передбачених проектом, що дозволяє забезпечити мінімальну ймовірність відмови конструкцій або забезпечити задану надійність конструктивної системи.

6. Уперше розроблено алгоритм визначення надійності системи з елементами, які раптово виключаються, що забезпечує прозору інтерпретацію та взаємозв'язок елементів розв'язуваного завдання як усередині алгоритму, так і в разі потреби виходу на зовнішні стандартні програми при реальному проектуванні, що дозволяє широко використовувати їх для розрахунку конструкцій об'єктів поверхні.

7. Для умов недостатньої інформації стану елементів конструкцій будівель і споруд поверхневого комплексу запропоновано нову концепцію керування конструкційною безпекою гірничотехнічних об'єктів, в основу якої покладено критерії оцінювання їх стійкого стану – параметр конструктивної безпеки системи й надійність елементів у часі – для попередження катастрофічних і важких наслідків при експлуатації, а також встановлено закономірності появи й поширення дефектів, що дозволяє вчасно проводити відповідні способи і заходи щодо забезпечення експлуатаційної надійності.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків та рекомендацій** підтверджуються достатнім обсягом і результатами промислових і лабораторних досліджень, коректністю поставлених завдань, застосуванням апробованих методів статистики й теорії ймовірності, задовільною збіжністю результатів аналітичних і натурних досліджень (77-83%), адекватністю розроблених математичних моделей, позитивними результатами реалізації розроблених способів і методик у виробничих умовах.

**Наукове значення роботи** полягає в установленні нових закономірностей визначення параметрів дефектності, які супроводжують зміну надійності елементів конструкцій промислових споруд поверхні шахт, обґрунтуванні на їх основі мето-

дологічних підходів до створення й розробки ефективних способів забезпечення надійності для подальшої експлуатації промислових об'єктів в умовах недостатньої інформації про їх технічний стан.

**Практичне значення роботи** полягає в розробці:

- методики розрахунку параметрів надійності при нормальному й раптовому аварійному впливах на систему об'єкта загалом в умовах недостатньої інформації;
- методу визначення значень критичних технічних параметрів надійності елементів конструкцій, при досягненні яких будівля починає перехід у неприпустимий стан;
- організаційної структури інформаційно-інженерного забезпечення для системи керування якістю виконання робіт при реконструкції об'єктів поверхні;
- практичних рекомендацій щодо застосування результатів досліджень при реконструкції гірничотехнічних будівель і споруд;
- рекомендацій для приведення в працездатний стан елементів конструкцій надшахтної будівлі ш. «Центральна», шахти «Ювілейна» ПАТ «СУХА БАЛКА» і за рахунок цього збільшення терміну безпечної експлуатації;
- рекомендацій щодо визначення граничних термінів безпечної експлуатації об'єктів поверхневих комплексів шахт при плануванні проведення ремонтно-відновлювальних робіт ПАТ «Криворізький залізрудний комбінат»;
- рекомендацій щодо подальшої експлуатації та проведення ремонтних робіт споруди копра ствола «Південний» Інгульської шахти та споруди копра ствола «Головний» Новокостянтинівської шахти ДП «СхідГЗК»;
- рекомендацій щодо визначення граничного терміну безпечної експлуатації в умовах недостатньої інформації технічного стану елементів конструкцій для ДП «ДПІ «Кривбаспроект», що використовувалися під час розробки робочих проектів відновлення, заміни та посилення пошкоджених елементів конструкцій проектів будівель та споруд ДП «СхідГЗК», ПАТ «СУХА БАЛКА», ПрАТ «ПівнГЗК».

**Реалізація висновків і рекомендацій роботи.** Результати досліджень реалізовані: на шахті «Центральна», шахти «Ювілейна» ПАТ «СУХА БАЛКА» з очікуваним економічним ефектом 120,0 тис. грн на рік; на шахтах «Родіна», «Октябрська», «Гвардійська» і «Тернівська» ПАТ «Кривбасзалізрудком» при розробці проектів реконструкції будівель і споруд поверхневого комплексу з очікуваним економічним ефектом 135,0 тис. грн на рік; на об'єктах СП ПАТ «ММК ім. Ілліча» ГЗК «Укрмеханобр» при визначенні рівня впливу вибухових робіт у кар'єрі на будівлі, розташовані поблизу з очікуваним економічним ефектом 235,0 тис. грн на рік; ДП «ДПІ «Кривбаспроект» при розробці робочих проектів для ДП «СхідГЗК», ПАТ «СУХА БАЛКА», ПрАТ «Півн ГЗК» комплексу з очікуваним економічним ефектом 249 643, 30 грн на рік; на Інгульській та Новокостянтинівській шахтах ДП «Схід ГЗК» при визначенні термінів використання наявних конструктивних елементів копрів з метою зменшення витрат на реконструкцію з очікуваним економічним ефектом 223 611,50 грн.; у навчальному процесі Державного вищого навчального

закладу «Криворізький національний університет» при підготовці фахівців і магістрів за спеціальністю «Шахтне і підземне будівництво» та в науковій діяльності, включаючи підготовку аспірантів.

**Особистий внесок автора.** Автор самостійно сформулював наукову проблему, ідею і мету роботи; поставлені задачі досліджень; обрав методи досліджень; виконав аналіз літературних джерел і виробничого досвіду з проблеми, що розглядається в дисертації; розробив або вдосконалив методики й програми виконання натурних і лабораторних досліджень, математичні моделі та підходи до чисельного моделювання, що використовуються в ході розв'язання поставлених у роботі завдань; наукові положення, висновки й рекомендації. Автор брав безпосередню участь у проведенні натурних промислових спостережень, виконанні лабораторних досліджень і чисельному моделюванні; у розробці технічних рішень і впровадженні результатів досліджень у виробництво.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення, результати і зміст роботи доповідалися на міжнародних науково-технічних конференціях: «Сталий розвиток гірничо-металургійної промисловості» (Кривий Ріг, 2006-2014); «Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку – 2010» (Кривий Ріг, 2010), «Проблема старіння будівель та шляхи її вирішення» (Кривий Ріг, 2010), «Форум горняков» (Дніпропетровськ, НГУ, 2005, 2007, 2009-2011, 2013), «Геомеханика. Механика подземных сооружений» (РФ, Тула, ТулГУ, 2013), «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (Республіка Білорусь, Мінськ, БІТУ, 2013), «Современные способы реконструкции строительных объектов в условиях их плотного расположения» (Литва, Вільнюс, 2013), «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» (Австрія, Відень, 2017); міжнародних науково-технічних конференціях молодих вчених, аспірантів і студентів: «Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений» (Донецьк, ДонНТУ, 2005-2011), «Перспективы освоения подземного пространства» (Дніпропетровськ, НГУ, 2010), «Проблемы недропользования» (РФ, Санкт-Петербург, СПГТИ 2007).

#### **Публікації.**

За темою дисертації опубліковано 61 наукова праця, зокрема 2 монографії, 40 статей, опубліковані в спеціалізованих наукових виданнях (з них 3 – у зарубіжних періодичних виданнях, 9 – у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз), і 20 статей, опубліковані у збірках матеріалів конференцій та інших виданнях.

#### **Структура й обсяг роботи.**

Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел з 197 найменувань на 20 сторінках і 14 додатків на 20 сторінках. Містить 265 сторінок машинописного тексту, зокрема 106 рисунків і 15 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 345 сторінок.



## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, її зв'язок із науковими програмами, темами та планами, сформульовано мету, ідею й основні задачі роботи, предмет, об'єкт і методи досліджень, представлено наукові положення, які виносяться на захист, викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також відомості про реалізацію, апробацію та публікації основних результатів дисертації.

**Перший розділ** дисертації присвячено аналізу стану методологічного забезпечення проведення робіт з огляду на розв'язання проблеми безпечної експлуатації гірничотехнічних будівель і споруд в умовах недостатньої інформації при їх експлуатації та проведенні обстежень.

На сучасних гірничодобувних підприємствах проблема організації безпечної експлуатації будівель і споруд поверхні, а також ефективності й надійності функціонування всіх об'єктів підприємства може бути розв'язана шляхом розробки й впровадження концепції керування конструкційною безпекою, що встановлює безпечний ресурс об'єкта, для своєчасного вжиття відповідних способів і заходів щодо забезпечення експлуатаційної надійності.

Розв'язанню проблеми визначення надійності різних типів будівельних конструкцій із застосуванням імовірнісних методів оцінювання граничних станів присвячено праці багатьох учених і колективів провідних вузів і науково-дослідних інститутів. До фундаментальних робіт відносять праці В.В. Болотіна, А.А. Гвоздева, А.Р. Ржаніцина, А.Г. Ройтмана, більш пізні дослідження Г.А. Генієва, В.І. Колчунова, В.М. Бондаренка, С.М. Скоробогатова. В області комплексного аналізу будівельних об'єктів, в тому числі конструкцій шахт і підземних споруд, заслуговують праці А.Я. Барашикова, О.М. Малишева, А.П. Мельчакова, Г.І. Гайка, В.С. Уткіна, В.Є. Волкової, О.Л. Тютюкіна, С.Д. Штовби та ін.

Недоліки відомих теорій надійності – складність отримання достовірних даних у кількості, достатній для подальшої їх обробки методами теорій імовірностей. Певні труднощі при обчисленні показників надійності викликає обчислення зміни несучої здатності споруди в часі. Це, в свою чергу, вимагає проведення детального аналізу технічного стану та надійності елементів конструкцій експлуатованих об'єктів поверхні, а також приведення до єдиного узгодженого вигляду наявних для організації та проведення робіт сучасної нормативної літератури та методик.

Для проведення такого аналізу пропонується використовувати сучасний математичний апарат статистичних законів розподілення.

Аналіз стану будівель і споруд на поверхні гірничодобувних підприємств України продемонстрував, що найбільш трудомісткими процесами при їх експлуатації є заходи щодо забезпечення надійності елементів в умовах недостатньої статистичної інформації про їх технічний стан. Незважаючи на численні дослідження, на сьогодні це є одним із недостатньо вивчених явищ. Саме тому в технічному плані досягти відчутних позитивних результатів досі не вдається. Однією з причин такої ситуації є те, що математичні та фізичні моделі, які використовуються, не повністю відображають реальний процес.

Використання математичного апарату та імовірнісно-статистичних методів

технічної діагностики є необхідною базою для представлених досліджень і забезпечує необхідну методичну єдність із сучасною нормативною базою та вже в найкоротші терміни допоможе знайти необхідні рішення для створення основ конструктивної безпеки об'єктів поверхні.

Результати виконаних теоретичних досліджень дозволили визначити коло проблем, окреслити мету, ідею та задачі дисертаційного дослідження.

**Другий розділ** дисертації присвячено аналізу експлуатаційної надійності промислових об'єктів на поверхні шахт.

У Криворізькому національному університеті систематично виконуються роботи з технічної діагностики, розробка рекомендацій посилення й реконструкції будівельних конструкцій гірничотехнічних споруд шахтної поверхні. Загалом, дотепер накопичено діагностичні дані для семи основних підприємств «СхідГЗК», «Північний ГЗК», «КЗРК», «СУХА БАЛКА», «ЦГЗК», «Південний ГЗК», «ІнГЗК».

Для якісного виконання робіт і проведення досліджень створено інформаційну систему, що містить всебічний опис експлуатаційних умов, різних видів і природи виникнення дефектів і пошкоджень та базується на принципі використання відкритого банку даних. Система безперервно поповнюється й удосконалюється в міру накопичення матеріалів обстежень. Банк даних значною мірою пов'язаний з оцінюванням дефектного стану конструкцій. Необхідність розробки інформаційної системи для даного виду експлуатаційних пошкоджень додатково обґрунтовується її специфічними особливостями: різним характером пошкоджень та їх чисельністю, що вимагає спеціальної статистичної обробки даних; значною залежністю рівня корозійного зносу від умов експлуатації, конструктивної форми, об'ємно-планувальних рішень; істотним збільшенням або зменшенням перетинів у часі, що вимагає врахування можливості прогнозування зносу.

Інформація по об'єктах поверхневого комплексу шахт, з різним терміном експлуатації, оброблялася з використанням створеного автоматизованого банку даних. На основі статистичного оброблення даних про величину дефектів отримано матеріали, необхідні для оцінювання технічного стану конструкцій досліджуваних об'єктів.

За зовнішніми ознаками формування та вдосконалення проектних рішень, організації й технології будівництва гірничотехнічні будівлі та споруди поділяються на дві групи:

А – будівлі та споруди, що безпосередньо пов'язані з основним виробничим процесом;

Б – будівлі та споруди виробництв допоміжного призначення, які обслуговують основні процеси.

Група А включає чотири підгрупи, класифіковані за технологічними ознаками. При цьому об'ємно-планувальні та конструктивні розв'язання будівель і споруд підгруп істотно відрізняються одне від одного. (А-1 – копри; А-2 – надшахтні будівлі та споруди з переробки корисних копалин; А-3 – споруди вантажно-складських комплексів; А-4 – споруди конвеєрного транспорту). Група Б у нашому випадку розглядається як одна, будівлі та споруди в якій класифіковані за архітектурно-конструктивними ознаками.

Матеріали обстежень вказують на наявність процесу виникнення дефектів, обумовленого накопиченням пошкоджень на всіх стадіях функціонування конструкцій: виготовлення, перевезення, зберігання, монтажу, експлуатації. Дефекти в стадії експлуатації проявляються у вигляді накопичення механічних пошкоджень (різні вирізи в елементах, вм'ятини, тріщини та ін.), корозійного зносу, деформацій каркасів при нерівномірних просіданнях фундаментів. Багато дефектів і пошкоджень виникають після реконструкції. Трапляються такі дефекти, як зміна схеми роботи конструкції й деформації елементів у результаті перевантаження без проектного обґрунтування. Отримані результати доповнюють накопичену базу даних, яка відображає забезпечення надійності гірничотехнічних об'єктів із урахуванням їх фактичного стану.

Для наочного розгляду сформованої ситуації на досліджуваних об'єктах далі наведено картину у вигляді графіків розвитку інтенсивності дефектів у часі.

На рис. 1 представлено дані по групі А-1. У перші 35–38 років спостерігаємо рівномірний розвиток дефектів у всіх елементах, без виникнення прогресивних стрибків. Далі до 57 року експлуатації спостерігається стрибкоподібний розвиток дефектності конструкцій уже за основними групами елементів. Після 60 років спостерігаємо різке збільшення інтенсивності появи дефектів. Виділяються три групи елементів – підкопрові рами, верстат, укосина. Особливе здивування викликають елементи укосини. Але це може бути пов'язано з неправильним ставленням до важливості цієї групи при експлуатації.

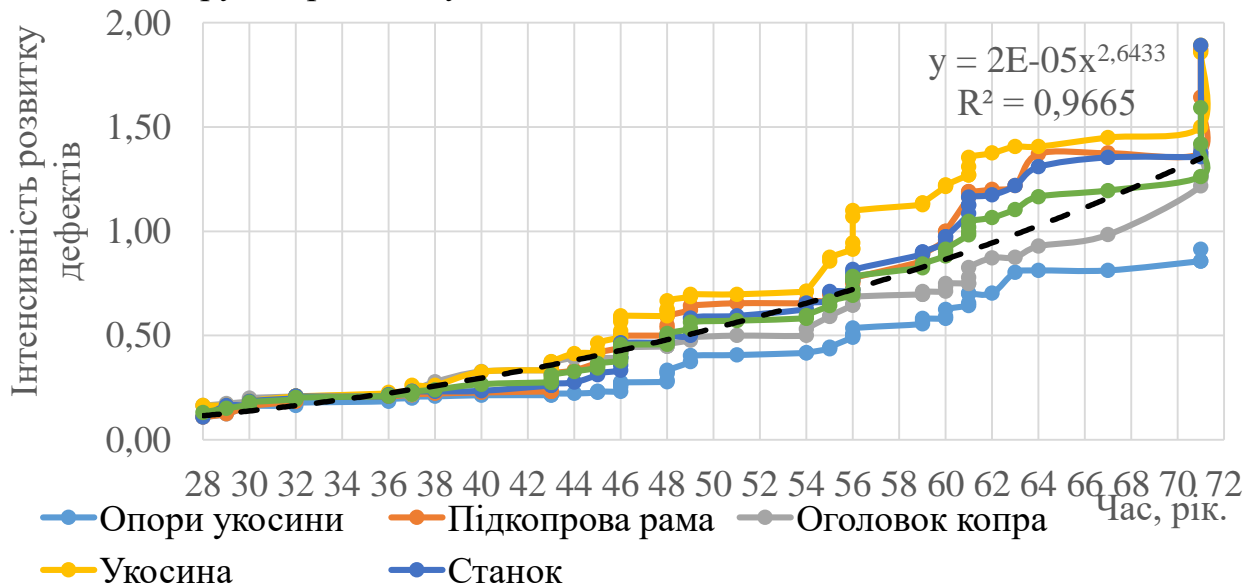


Рис. 1. Інтенсивність розвитку дефектів елементів групи А-1 у часі

На наступному рис. 2 представлено дані для групи А-4. Тут картина змінюється. Рівномірний розвиток дефектів за всіма елементами без виникнення прогресивних стрибків відбувається протягом 40 – 45 років. Далі до 57 року експлуатації спостерігається рівномірний розвиток дефектності конструкцій вже за основними групами елементів. Після 57 років спостерігаємо різке збільшення інтенсивності

появи дефектів. Виділяються вже чотири групи елементів – перекриття, стіни, монолітний блок і металеві конструкції. Така ситуація пов'язана з особливістю конструктивних особливостей даної групи об'єктів.

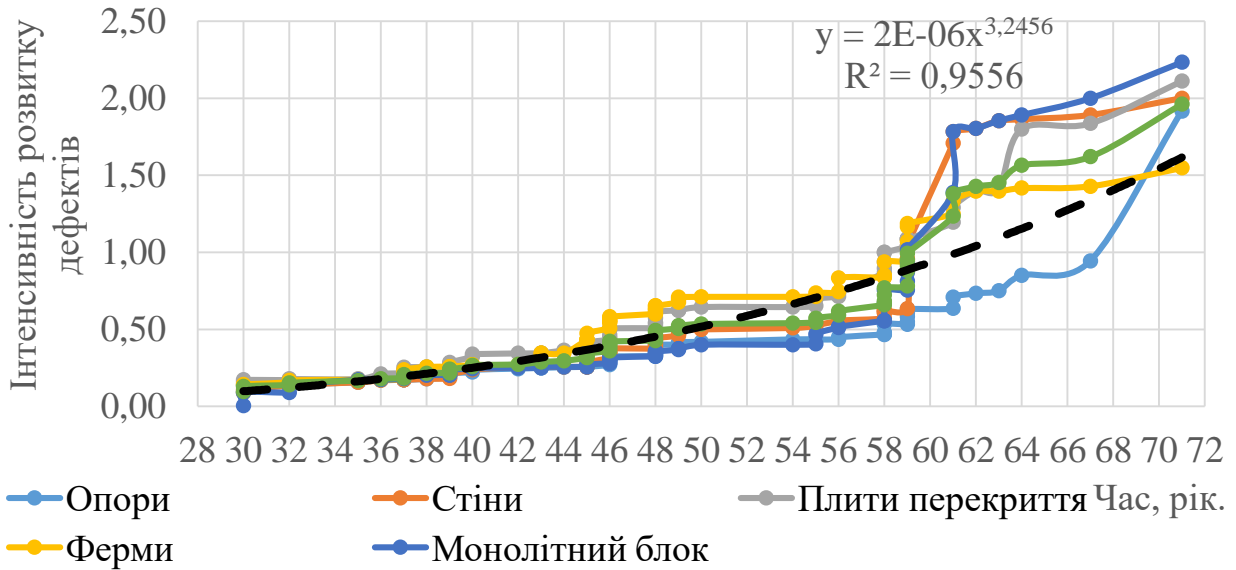


Рис. 2. Інтенсивність розвитку дефектів елементів групи А-4 у часі

**Третій розділ** дисертації присвячено моделюванню міцності промислових об'єктів на поверхні шахт.

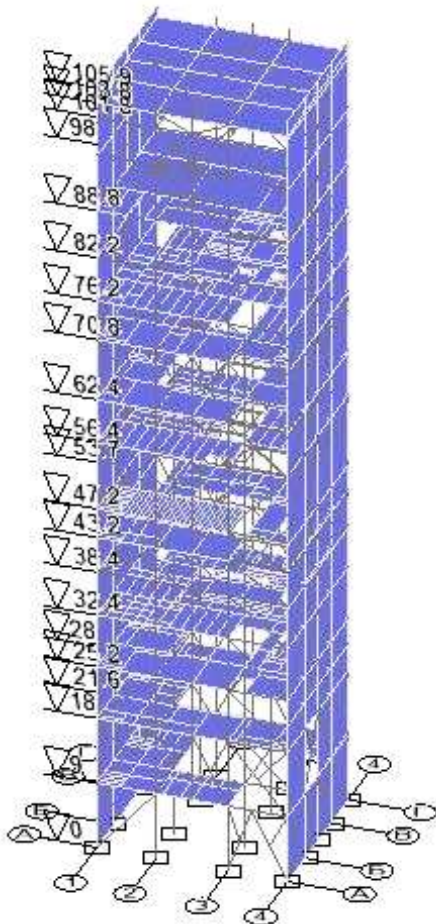


Рис. 3. Загальний вигляд копра

Розрахунок виконано за допомогою проектно-обчислювального комплексу SCAD. Комплекс реалізує скінчено-елементне моделювання статичних і динамічних розрахункових схем, перевірку стійкості, вибір невідгінних поєднань зусиль, добір арматури залізобетонних конструкцій, перевірку несучої здатності сталевих конструкцій будівель і споруд.

В основу розрахунку покладено метод скінчених елементів із використанням як основних невідомих переміщень і поворотів вузлів розрахункової схеми. У зв'язку з цим ідеалізацію конструкції виконано у формі, пристосованій до використання цього методу, а саме: система представлена у вигляді набору тіл стандартного типу (стрижнів, пластин, оболонок тощо).

Розрахункова схема характеризується такими параметрами: кількістю вузлів; кількістю кінцевих елементів; загальною кількістю переміщень і поворотів; кількістю завантажень; кількістю комбінацій завантаження. Статичний розрахунок системи виконано в режимі лінійної постановки. Об'єктом дослідження є бу-

дівельні конструкції баштової надшахтної будівлі ш. «Ювілейна» (рис.3).

Із наведених результатів досліджень випливає, що більш навантажені елементи конструкцій баштового копра знаходяться в районі нульової позначки, а також у місцях розташування підйомних машин.

Подальші дослідження відповідно будемо проводити по найбільш навантажених ділянках. Проводилися дослідження зміни напружень, що виникали, залежно від ступеня корозії елементів. Результати досліджень подано у вигляді залежностей (рис. 4 – 6).

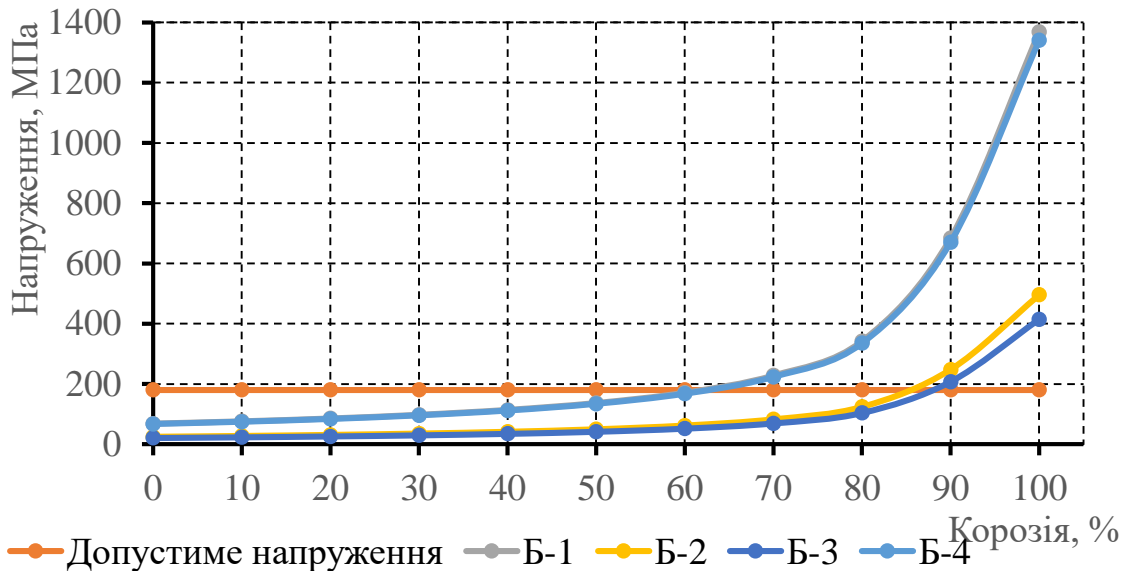


Рис. 4. Зміна напружень в елементах залежно від ступеня корозії на відм. 0,000 по осі Б

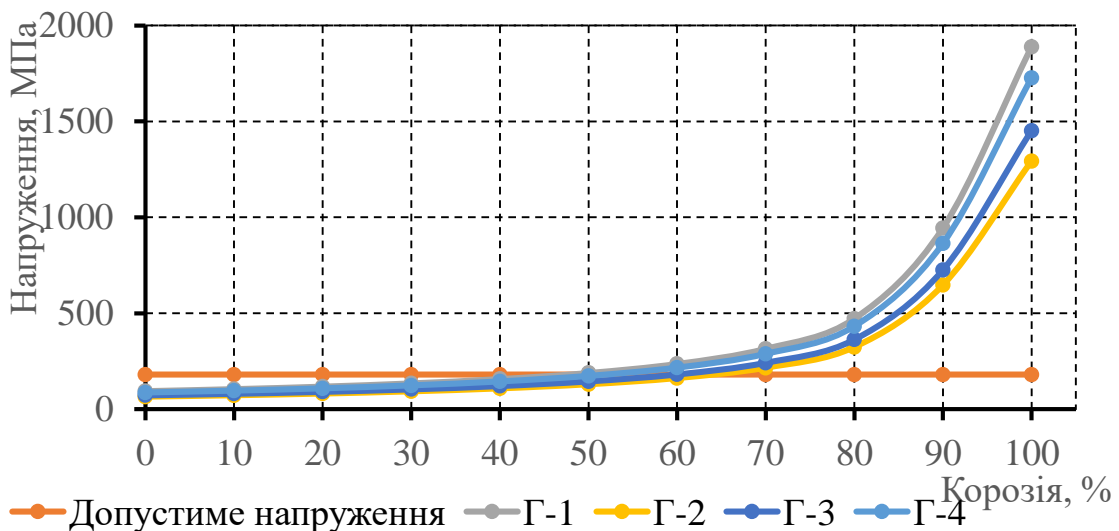


Рис. 5. Зміна напружень в елементах залежно від ступеня корозії на відм. 0,000 по осі Г

Як бачимо з поданих залежностей, при корозії після 50% елементи конструкцій зовсім не придатні до експлуатації. Більш кращий вигляд мають конструктивні елементи так званого внутрішнього кола. Тут вихід з ладу конструкцій прогнозу-

ється на рівні корозії в 70%. Результати досліджень на відм. +70,600 також дозволяють говорити про вихід елементів конструкцій при корозії в 40–50% і тільки в окремих елементах – 70–80%. Результати досліджень на відм. +82,200 дозволяють говорити про вихід елементів конструкцій при корозії в 70–80% і тільки в окремих елементах – 40–50%. Це може бути обумовлено відсутністю низки додаткових навантажень на відміну від нижчих позначок.

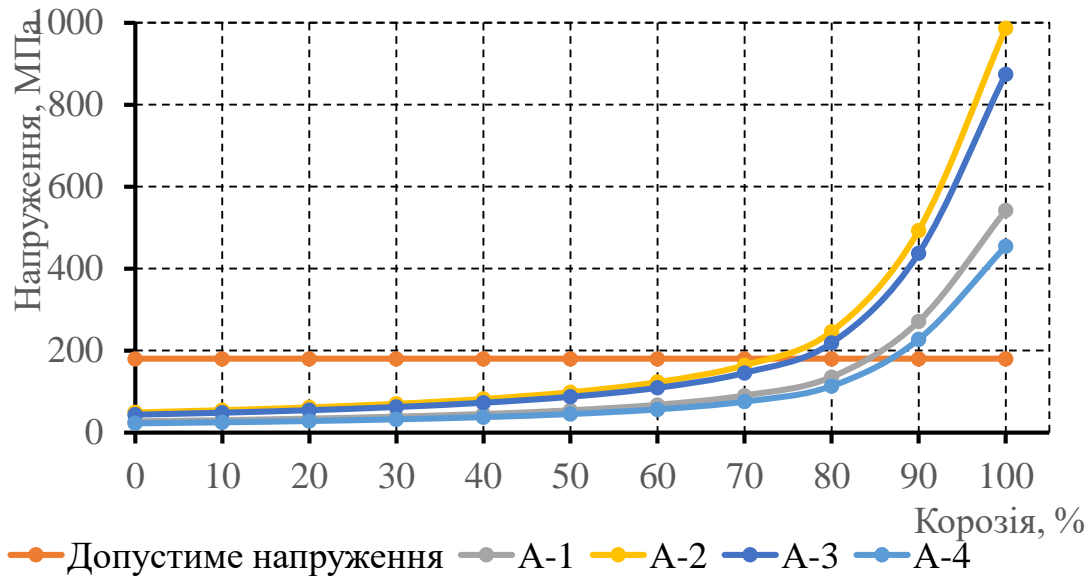


Рис. 6. Зміна напружень в елементах залежно від ступеня корозії на відм. +82,200 по осі А

При проведенні досліджень міцності конструкцій галерей (рис. 7) у розрахунку прийнято три плоскі розрахункові схеми: із довжиною прогону 18 м; з довжиною прогону 24 м; з довжиною прогону 30 м.

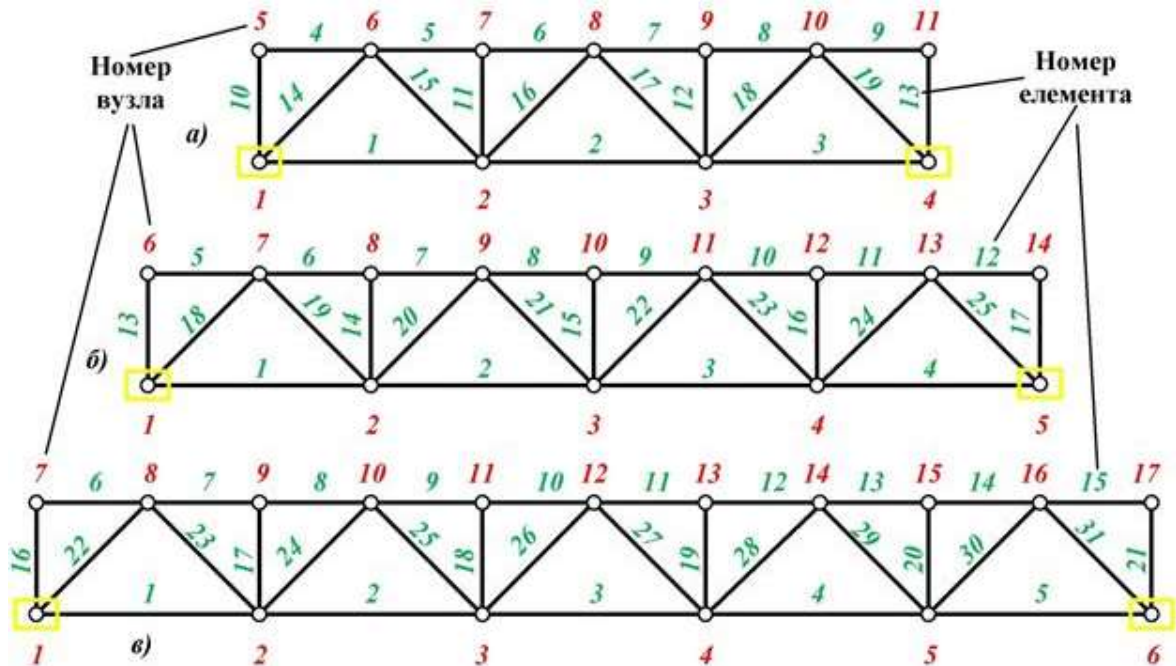


Рис. 7. Розрахункові моделі ферм галерей  
а) прогін довжиною 18 м; б) прогін довжиною 24 м; в) прогін довжиною 30 м



Методика досліджень напружено-деформованого стану конструкцій полягає у наступному. Динамічні переміщення несучих конструкцій визначаються за нормативними значеннями динамічних навантажень, а динамічні зусилля (згинальні та крутний момент, поздовжні й поперечні сили) визначаються за розрахунковими значеннями динамічних навантажень.

При визначенні динамічних переміщень і внутрішніх зусиль в елементах перекриттів із зовнішнього навантаження враховуються тільки вертикальні сили й діючі у вертикальній площині моменти, а при визначенні динамічних переміщень і внутрішніх зусиль стояків і стін при горизонтальних коливаннях – тільки сили й моменти, що діють у горизонтальній площині.

При розгляді вертикальних коливань визначенню підлягають найбільші значення переміщення та згинального моменту в прогонах, а також згинального моменту й поперечної сили на опорах.

У результаті повного полегшення прогону завдовжки 18 м сумарне переміщення від статичного завантаження дорівнює 33.2 мм.

При розрахунку від статичної складової завантаження простежується пряма залежність внутрішніх зусиль від маси прогону. Зі зменшенням маси зусилля від статичного навантаження зменшуються. Що стосується динамічної складової завантаження, то тут простежується зворотна залежність. Величина динамічних зусиль в елементах ферми зростає при зменшенні маси прогону, а при близькості частоти вимушених коливань до першої частоти вільних коливань, тобто при режимах, близьких до резонансу, навіть перевищує величину статичних зусиль. Це може привести до порушення технологічного процесу або аварійної ситуації.

У нашому випадку проведемо дослідження розвитку напруженого стану в конструкціях від їх технічного стану через їх корозію. Отримані результати подано у вигляді залежностей. На рис.8 подано залежності для прогону 18 м.

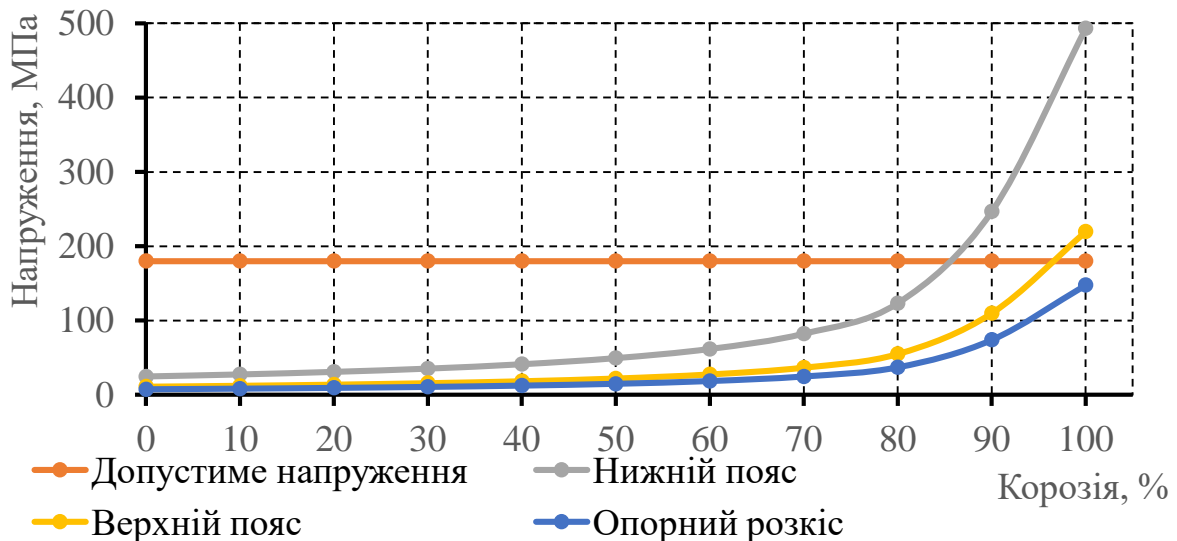


Рис. 8. Зміна напружень від величини корозії в елементах ферми

Результати досліджень в елементах ферми прогінної будови завдовжки 18, 24 і 30 м дозволяють говорити про вихід елементів конструкцій при корозії в 70–80%

і тільки в окремих елементах – 40–50%. Довжина прогону істотно не впливає на зміну результатів які знаходяться в одному порядку.

У результаті досліджень за допомогою комп'ютерного моделювання отримані залежності характеризують розвиток напружено-деформованого стану в елементах конструкцій складних систем поверхні шахт.

Проведені дослідження підтверджують раніше висловлене про те, що виявлення дефекту більше залежить від величини початкового дефекту, ніж від величини навантаження, і вимагає продовження досліджень для визначення часу до руйнування певного дефекту при різних значеннях діючих навантажень або тих, що виникають.

**Четвертий розділ** дисертації присвячено розробці методів і засобів кількісного аналізу надійності промислових об'єктів на поверхні шахт.

Якість виконання робіт реконструкції промислових споруд безпосередньо залежить від максимально можливого виявлення наявних дефектів. Це завдання надзвичайно важливе, оскільки не виявлені дефекти проявляються у вигляді аварій конструкцій у процесі експлуатації промислових споруд. Досить великий чи малий об'єм, що має різну конфігурацію, можна досліджувати різними способами: або цілком, або розбиваючи на окремі площини. Але щоб отримати параметр надійності дослідження в кількісній формі, потрібно розв'язати низку досить складних завдань. До них слід віднести, перш за все, фізичний опис зростання дефекту в процесі дослідження. Потім перейти до розв'язання завдання подання результатів дослідження у вигляді статистичних даних.

У складних системах відмова навіть одного елемента може призвести до виключно серйозних наслідків. Тому основним завданням є вибір найкращих конструктивних і механічних параметрів системи з урахуванням таких факторів, як вартість, надійність, вага й об'єм. В основу розрахунків надійності покладено те, що кожен елемент має певну міцність відносно навантажень. Для досягнення цієї мети необхідне проведення оцінювання надійності елементів на етапі проектування.

Звичайний спосіб проектування, заснований на застосуванні таких дуже довільних коефіцієнтів, як коефіцієнт безпеки й запас міцності, не дозволяє робити висновки про ймовірність відмови елемента. Крім того, навіть при одному й тому ж коефіцієнті безпеки ймовірність відмови може коливатися в досить широких межах.

Використання коефіцієнта безпеки виправдане тільки в тому випадку, коли його значення задано на основі великого досвіду застосування аналогічних елементів, що розглядалися. Крім того, конструктивні параметри часто є випадковими величинами, які повністю ігноруються при звичайних методах проектування.

Зрозуміло, що звичайний детерміністичний підхід до проектування не є задовільним з погляду аналізу надійності.

Тому запропоновано іншу методику проектування, яка враховує ймовірнісний характер конструктивних параметрів, для того, щоб надійність елементів можна було оцінювати на етапі проектування.



У цьому випадку наочно задаються всі конструктивні параметри, які, в свою чергу визначають розподілення напружень і міцності (рис. 9). Після визначення розподілень обчислюється ймовірність безвідмовної роботи елемента.

При цьому під мірою надійності розуміється ймовірність того, що максимальне напруження, яке виникає під дією навантаження, не перевищить несучої здатності (міцності) елемента, тобто

$$H = P(R > [\sigma]),$$

де  $H$  – надійність;  $P$  – імовірність події;  $R$  – несуча здатність;  $[\sigma]$  – діюче максимальне напруження.

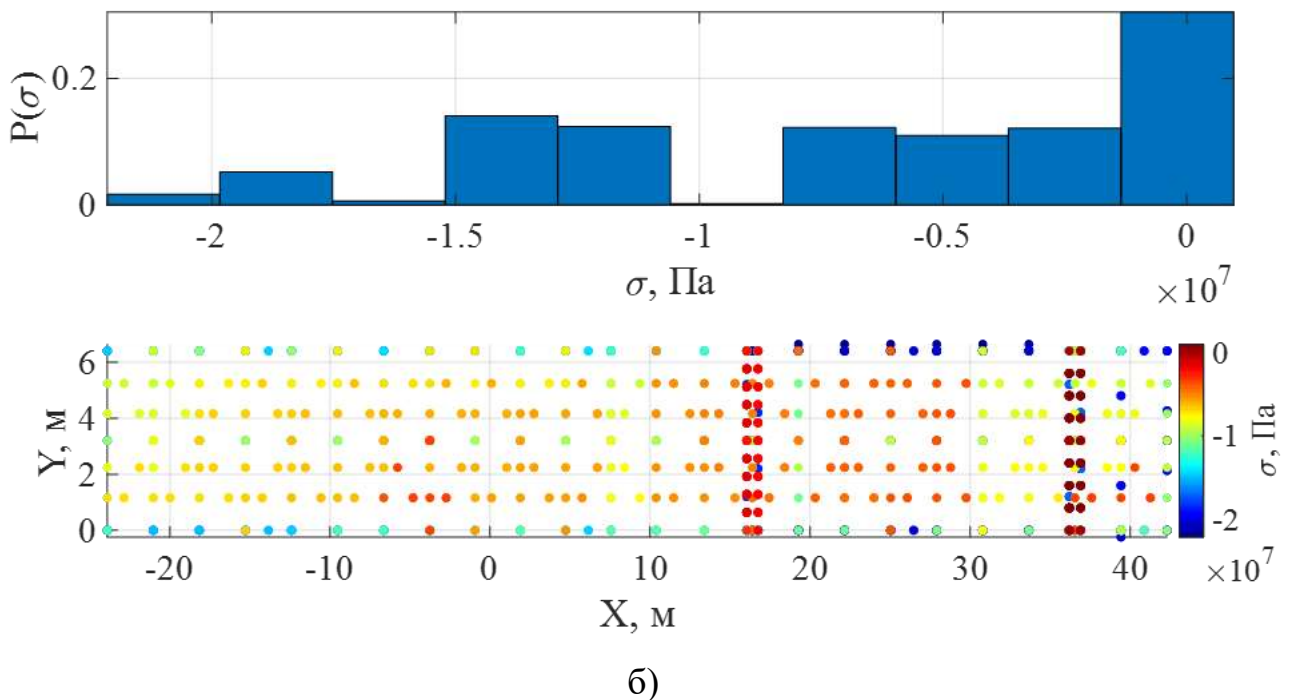
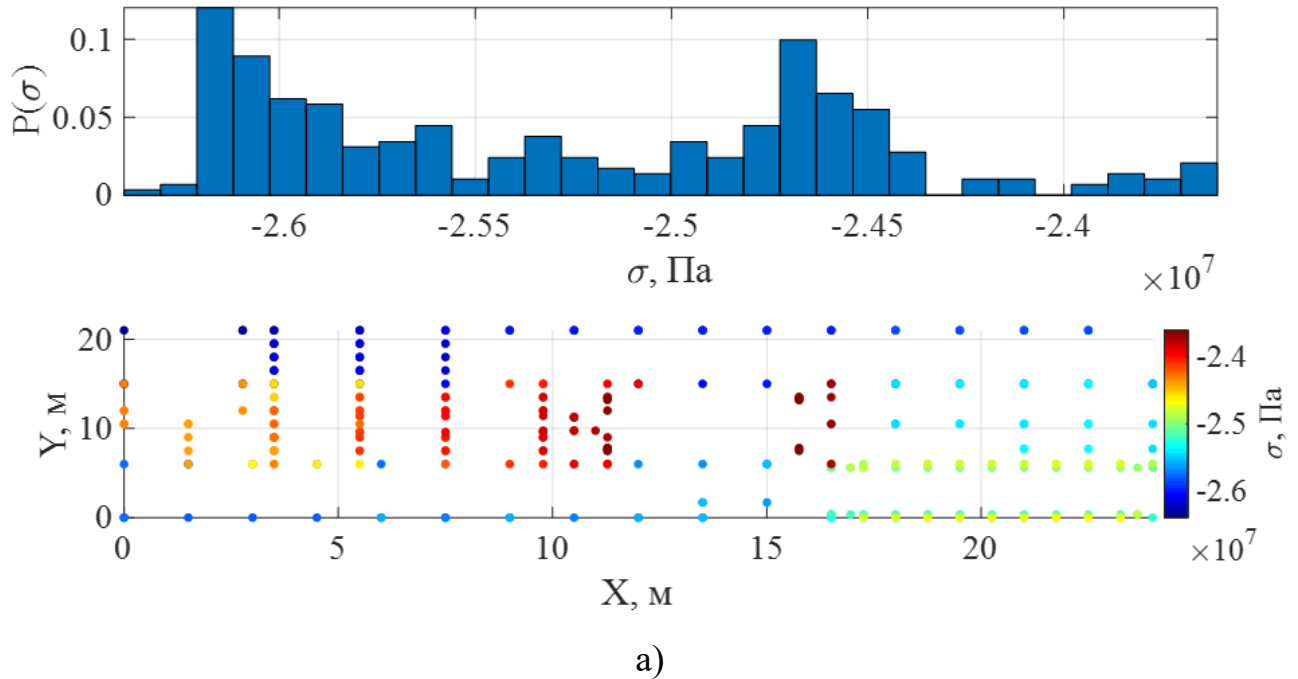


Рис. 9. Розподілення напружень у вузлах для копра (а) й галереї (б)

У загальному випадку

$$P(R > [\sigma]) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\sigma) \left[ \int_{\sigma}^{\infty} f(R) dR \right] d\sigma.$$

Із використанням цього виразу обчислено ймовірність безвідмовної роботи елемента при різних поєднаннях законів розподілення несучої здатності й навантаження. У разі нормального розподілення навантаження й несучої здатності ймовірність безвідмовної роботи визначається виразом:

$$P(R > [\sigma]) = \frac{1}{2} + \Phi \left( \frac{m_R - m_{\sigma}}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \right),$$

де  $\Phi()$  – нормована функція Лапласа;  $m_R$  і  $m_{\sigma}$  – математичне сподівання величин  $R$  і  $\sigma$ , відповідно;  $\sigma_1$  і  $\sigma_2$  – середньоквадратичне відхилення величин  $R$  і  $\sigma$ , відповідно

У реальних ситуаціях несуча здатність елемента та його довговічність залежать від геометричних розмірів, характеристик матеріалу й факторів, що впливають на технічний стан. Якщо геометричні параметри є детермінованими величинами, то характеристики матеріалу елемента носять випадкові величини із заданими законами розподілення, прояв та інтенсивність зовнішніх факторів здебільшого носять суперечливий стохастичний характер, що не дає можливості описати технічний стан як теоретично, так і емпірично.

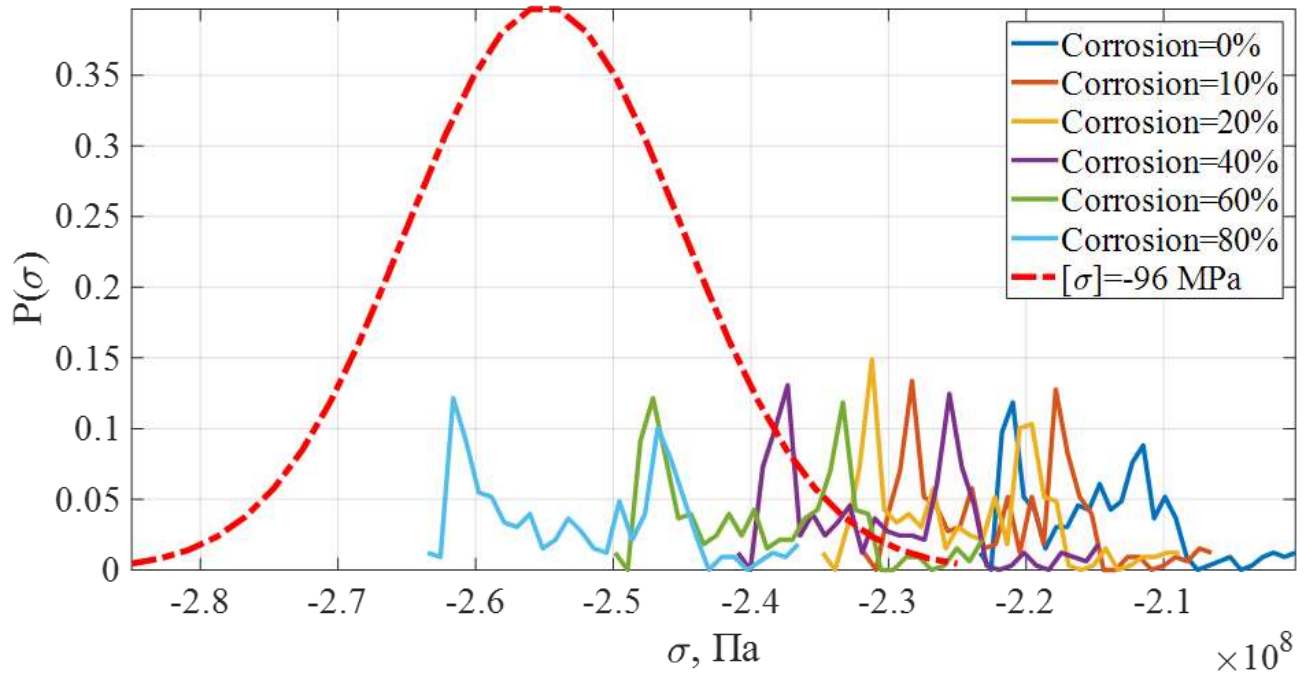
У зв'язку з цим випадкові процеси, що проходять, замінюємо зрізами одновимірних випадкових величин. З вищерозглянутого випливає, що в основу системи надійності покладено статистичні методи, що оперують параметрами функції розподілення, які описують як стан конструктивних елементів, так і зміну в часі.

Для розрахунку оцінок математичного сподівання, дисперсії, середньоквадратичного відхилення, коефіцієнта асиметрії та ексцесу (на основі моментів розподілення) не вимагається попереднього впорядкування та групування даних. Ці величини знайдено безпосередньо з вихідної вибірки (рис. 10). Для визначення медіани, квантилів розподілення, для видалення похибок із вибірки дані розташовано в порядку зростання, тобто вибірку впорядковано. Групування даних необхідне для знаходження форми розподілення та ідентифікації відповідного закону розподілення.

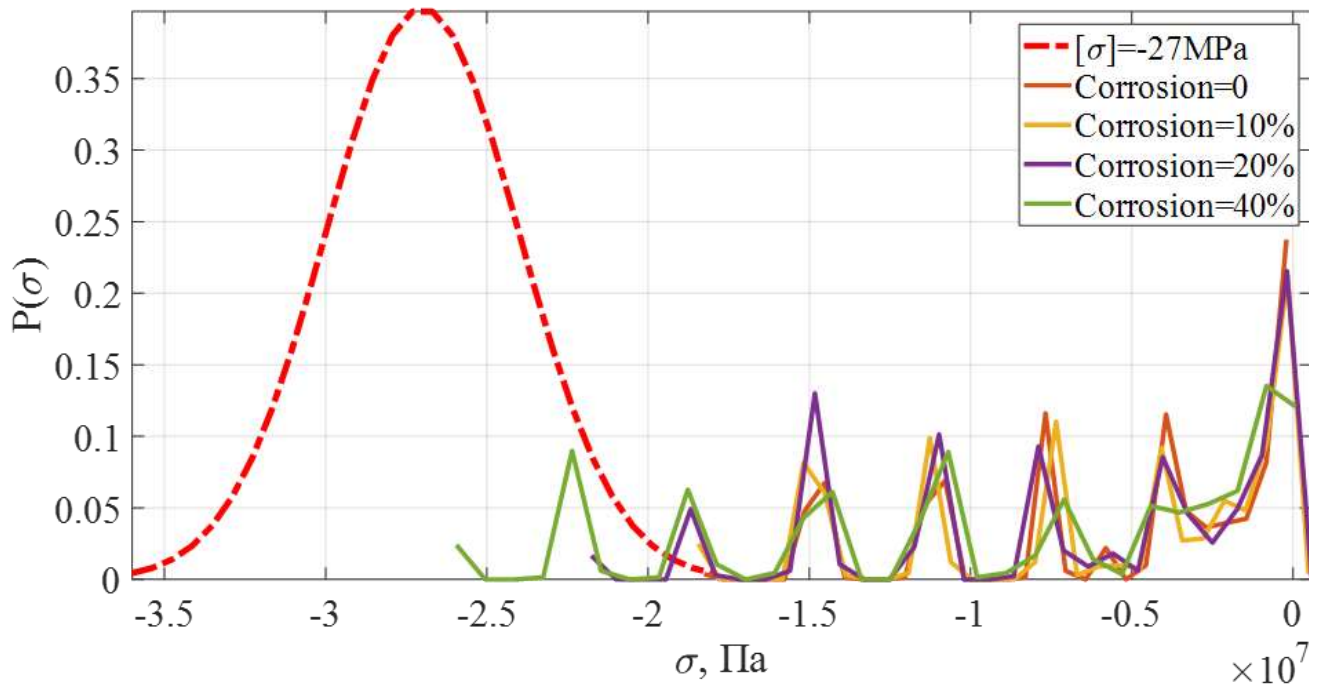
У результаті групування вибірку даних про технічний стан подано у вигляді гістограми, що складається зі стовпців (інтервалів групування), кожен з яких має свою ширину (рис. 11). Після нормування гістограма – це емпірична щільність розподілення випадкової величини.

Із якісних міркувань існує оптимальна кількість інтервалів групування. При великій кількості стовпців і тому малій їх ширині через випадковість вибірки гістограма буде заповнена дуже нерівномірно, матиме порізаний вигляд, скрадатиметься з великої кількості сплесків і провалів.

Перевага застосування типових законів розподілення полягає в їх вивченості та можливості отримання якісних, незміщених і високоефективних оцінок параметрів. Однак, типові закони розподілення не мають необхідної різноманітності форм, тому їх застосування не дає необхідної єдності в поданні випадкових величин, що трапляються при проведенні досліджень.



a)



б)

Рис. 10. Зміна ймовірнісного розподілення напружень залежно від дії корозії порівняно зі стандартним розподіленням напружень при стисканні для копра (а) й галереї (б)

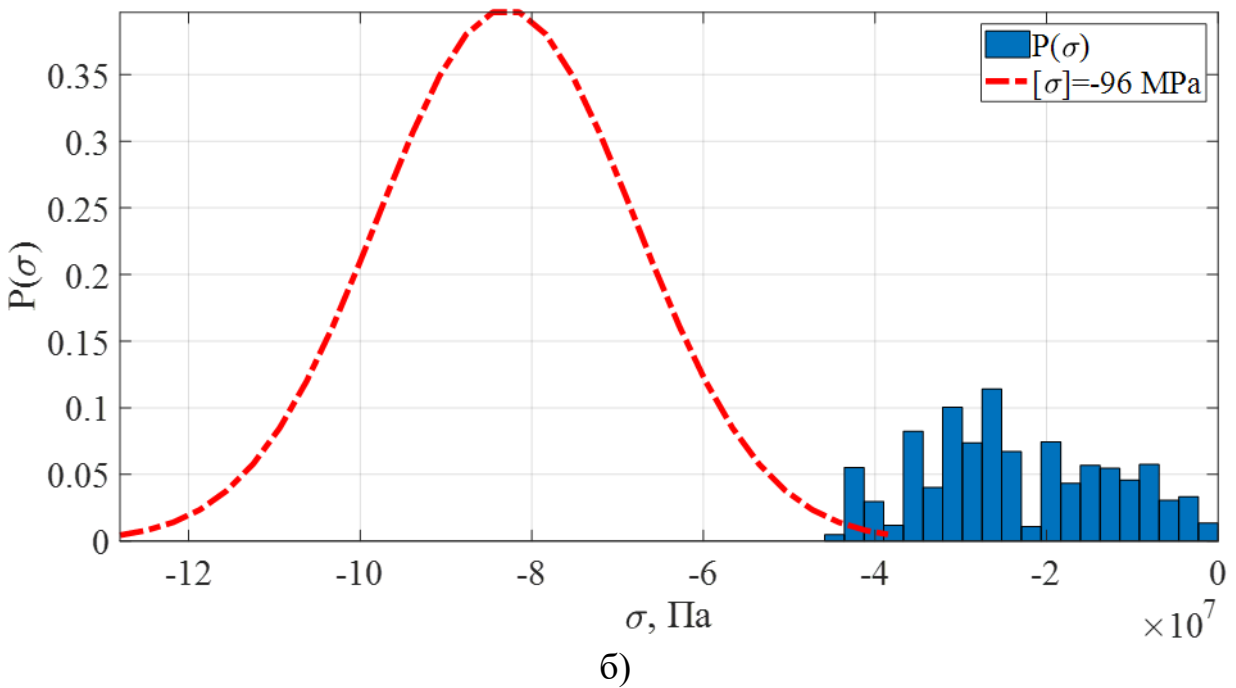
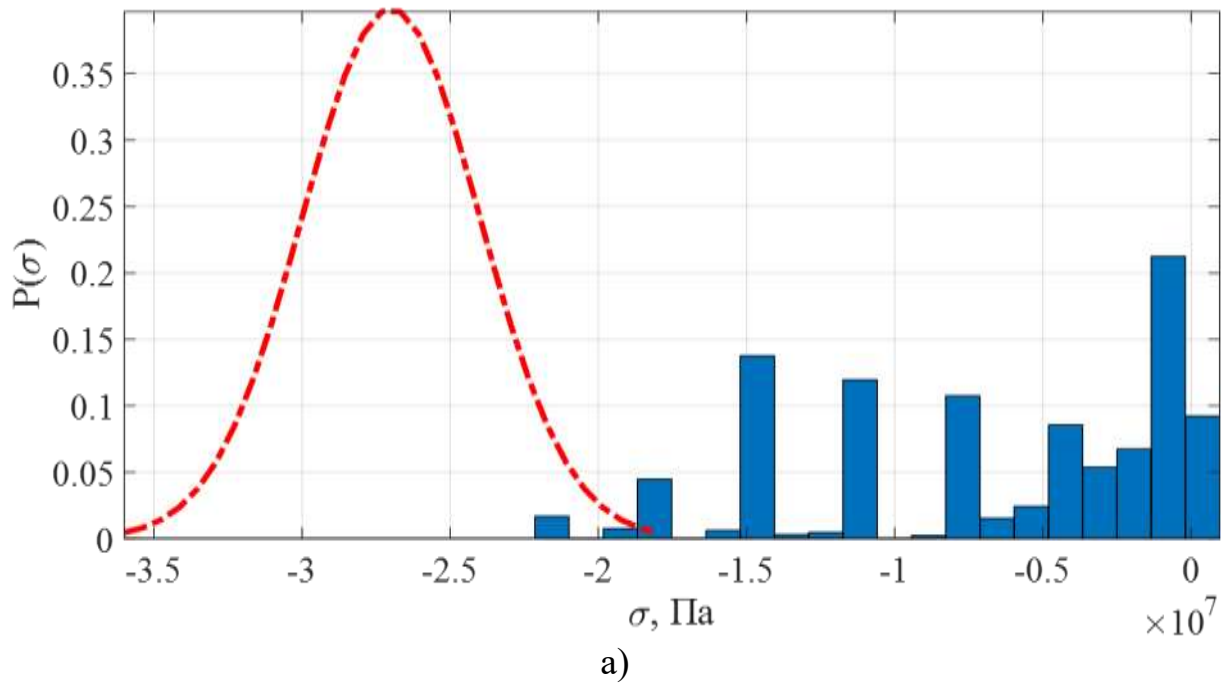


Рис. 11. Залежність зміни ймовірнісного розподілення напружень залежно від дії корозії для копра (а) й галереї (б)

Після ідентифікації закону розподілення на підставі отриманих результатів проводимо оцінювання надійності конструктивних елементів. Для оцінювання "надійності елемента" за отриманими щільностями розподілень і заданим розподіленням межі міцності будемо використовувати відстань Кульбака-Лейблера.

Відстань (дивергенція) Кульбака-Лейблера ( $D_{KL}$ ), інформаційна розбіжність, що розрізняє інформацію, інформаційний виграш, відносна ентропія – це невід'є-

мно значний функціонал, який є несиметричною мірою віддаленості один від одного двох імовірнісних розподілень, визначених на спільному просторі елементарних подій.

Для дискретних імовірнісних розподілень  $P$  і  $Q$  із кількістю елементарних подій  $n$  дивергенція Кульбака-Лейблера розподілення  $Q$  відносно розподілення  $P$  (або <відстань від  $P$  до  $Q$ >) визначається як:

$$D_{KL}(R||\Omega) = \sum_{i=1}^n p_i \log \frac{p_i}{q_i},$$

Узагалі, якщо  $\mu$  – будь-яка міра на  $X$ , для якої існують абсолютно безперервні відносно  $\mu$  функції  $p = \frac{dR}{d\mu}$  і,  $q = \frac{d\Omega}{d\mu}$ , тоді дивергенція Кульбака-Лейблера розподілення  $Q$  відносно  $P$  визначається як

$$D_{KL}(R||\Omega) = \int_X p \log \frac{p}{q} d\mu.$$

Основа логарифма в цій формулі суттєвої ролі не відіграє. Його вибір дозволяє зафіксувати конкретний вид функціонала з сімейства еквівалентних функціоналів і рівносильний вибору одиниці вимірювання дивергенції Кульбака-Лейблера (подібно ситуації з обчисленням ентропії), тому можливе застосування логарифма з будь-якою основою, більшою від одиниці. Дивергенція Кульбака-Лейблера є безрозмірною величиною незалежно від розмірності вихідних випадкових величин.

На рис. 12 подано графіки теоретичної щільності розподілення ймовірностей, що відповідають вибраним модельним вибіркам (червона лінія – щільність нормального розподілення напружень; синя – щільність розподілення, відповідно дійсного розподілення – напружених станів елементів).

Форми ідентифікованих законів змінюються як за висотою, так і за конструктивними особливостями висотної позначки. Також встановлено, що деградація форми закону відбувається в часі й пов'язана з такими процесами як корозія, механічний знос і накопичення інших пошкоджень. Тому для оцінювання залишкового ресурсу як системи загалом, так і складових її елементів переважно використано не чутливі до закону розподілення методи оцінювання, тобто використано непараметричні показники, такі як дивергенція Кульбака-Лейблера ( $D_{KL}$ ), є більш привабливим, ніж метод Байеса.

У ході проведеного аналізу отримано розрахункові значення дивергенції Кульбака-Лейблера для оцінювання "надійності" системи елементів конструкції.

Установлено, що зі зростанням впливу корозії значення  $D_{KL}$  зменшуються. Отже, можна бачити, що параметричне оцінювання дивергенції Кульбака-Лейблера в разі максимального значення  $D = 14.03$  відповідає розрахунковому (проектному) значенню, тоді як мінімальне ( $D = 0.468$ ) відповідає максимальному впливу корозії  $K = 80\%$ , що відповідає мініимальному рівню надійності конструктивного елемента.

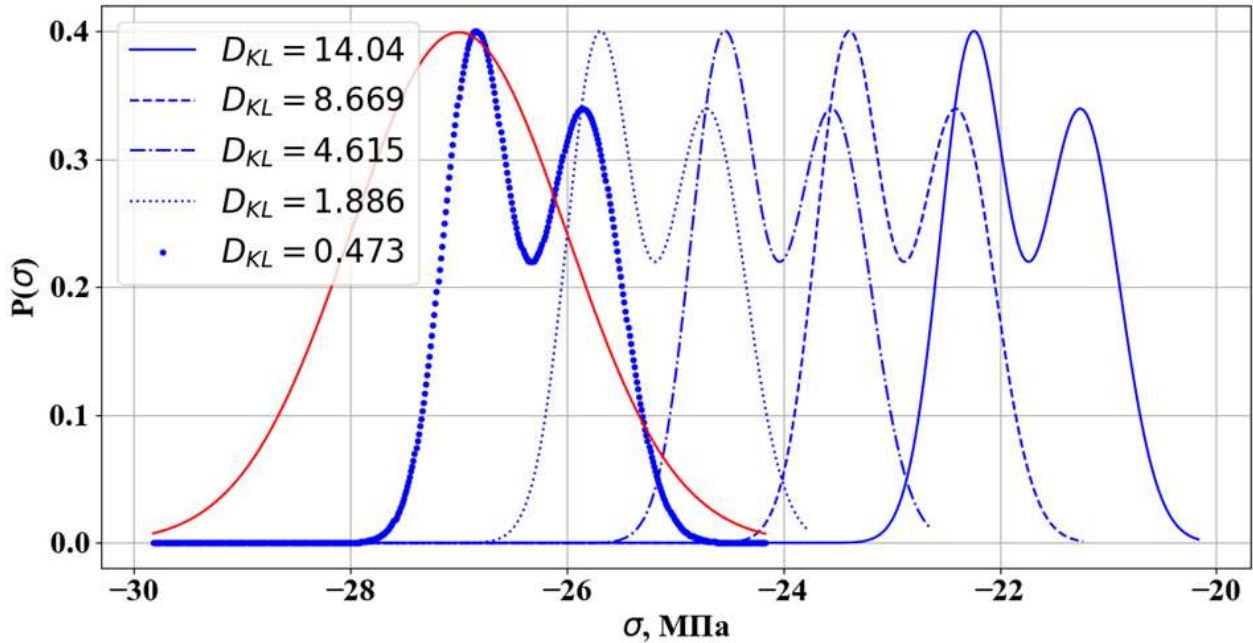


Рис. 12. Зміна дивергенції Кульбака-Лейблера під дією процесів корозії

Пов'язано це з тим, що відбувається зміщення закону розподілення напружень в елементах у бік закону розподілення межі міцності, а це призводить до зменшення відстані між законами розподілення та зниження залишкової межі міцності як елемента, так і системи загалом.

З іншого боку, дивергенція Кульбака - Лейблера може бути використана як міра інформаційного виграшу при переході від апіорного до апостеріорного ймовірнісного розподілення. У нашому випадку використовується для модифікації (апіорного) розподілення ймовірностей  $p(x|I)$  для  $x$  у нове (апостеріорне) розподілення ймовірностей  $p(x|y, I)$ , використовуючи теорему Байєса:

$$p(x|y, I) = \frac{p(y|x, I)p(x|I)}{p(y|I)}$$

Тобто, здебільшого, в моделі Байєса метою є максимізація очікуваної відстані Кульбака - Лейблера між апіорним і апостеріорним розподіленнями, що дає можливість оцінювання верхньої межі  $D_{KL}$ , а це призводить до використання оцінок Байєса і встановлення їх параметрів.

На останньому етапі сформуємо параметр надійності. Об'єднуючи апіорну інформацію  $I_a$  та емпіричні дані  $I_e$ , отримаємо оцінювання параметра надійності  $m$ . Уважаємо, що вся невизначеність зосереджена в параметрі  $m$ . Спочатку цей параметр має апіорне розподілення  $h(m)$ . Після надходження емпіричної інформації  $I_e$ , у нашому випадку це результати дослідження елементів конструкцій, апіорне розподілення змінюється. Результат зміни – апостеріорне розподілення, яке ми повинні знайти. Отже, апостеріорне розподілення параметра, що характеризує величину дефекту, є характеристикою для формування надійності конструкцій в експлуатації.

**П'ятий розділ** дисертації присвячено визначенню технічних параметрів надійності елементів конструкцій в умовах недостатньої інформації технічного стану.

Об'єкт поверхні гірничого підприємства – це складна система, що являє собою  $n$  кількість груп однотипних конструкцій (основа, фундамент, стіни, перекриття тощо). Під стандартним рівнем надійності груп елементів розуміємо такий рівень надійності, при якому надійність об'єкта за умови, що цей рівень мають усі  $n$  груп елементів, стає стандартним: нормальним, задовільним, непридатним або аварійним.

Стандартні рівні надійності груп елементів, на відміну від стандартних значень безпеки, не є сталими. Для визначення стандартних рівнів надійності об'єкт представлений у вигляді системи, що складається з ієрархічно з'єднаних  $n$  груп однотипних несучих елементів. Приймаючи гіпотезу, що людські помилки, допущені в одній із груп, не залежать від помилок, допущених в інших групах, для оцінювання рівня надійності будівлі об'єкта застосовуємо методи системної теорії надійності. У результаті маємо

$$v = \prod p_n,$$

де  $\prod p_n$  – рівні надійності всіх  $n$  груп будівлі об'єкта.

Середня надійність об'єкта

$$R = 1/M_v = 1/\prod p_n,$$

Припустимо, що в усіх  $n$  групах елементів об'єкта середні рівні надійності  $p_{n,ср}$  однакові. У цьому випадку середня надійність будівлі з визначення буде дорівнювати нормальному значенню  $R_H$ , а формула набуває вигляду  $R_H = 1/p_H^n$ , з якої й визначається нормальний рівень надійності елементів конструкції. У результаті маємо

$$p_H = \sqrt[n]{1/R_H}; \quad p_y = \sqrt[n]{1/R_y}; \quad p_n = \sqrt[n]{1/R_n}.$$

У момент проведення досліджень показниками технічного стану будівлі є величини, знайдені для всіх груп конструкцій. У сукупності ці показники утворюють необхідну інформацію для визначення середніх значень надійності, які відповідно до принципів теорії кваліметрії приймаються за «інтегральний» показник конструкційної безпеки об'єкта. Групи стану конструкцій призначаються експертом на основі інформації про їх технічний стан, на основі досвіду, знань та інтуїції.

У процес прийняття рішень про стан елементів конструкцій уведено необхідні положення теорії інформації, основним із яких є поняття ентропії системи. Ентропія в теорії інформації характеризує ступінь невизначеності станів системи.

Кількість можливих комбінацій  $N$  розірваних елементів (дефектів) із кількістю елементів  $n_1, n_2, \dots, n_i, n_n$  дорівнює кількості перестановок із необмеженими повтореннями:

$$N = m^n.$$

Відповідно до теорії зв'язку й інформації для одержання інформації всі  $N$  повідомлень є рівноймовірними, а отримання конкретного повідомлення рівносильне для нього випадковим вибором одного з  $N$  об'єктів з імовірністю  $1/N$ . Чим більша  $N$ , тим більша інформативність і тим більший ступінь невизначеності в повідомленні.

Кількість  $N$  слугує мірою інформації. Щодо елементів будівель і споруд поверхні шахт, що досліджуються, можна провести таку аналогію: комбінація  $N$  з більшої кількості зруйнованих елементів  $n_i$  повинна давати в результаті більшу кількість дефектів. Властивість адитивності щодо будівлі чи споруди також потрібна для врахування накопичення кількості зруйнованих елементів, що утворюють загальний стан об'єкта.

Отже, необхідно як міру кількості відомостей прийняти не саму кількість  $N$ , а деяку функцію від неї, бажано адитивного типу  $I = f(N)$ , а саме типу

$$I = \log N = n \log m,$$

де кількість інформації пропорційна величині  $n$  повідомлення й задовольняє умови адитивності ( $\log m$ ).

Використовуючи величину Стірлінга, переходячи до можливих і довільних основ логарифмів, отримуємо формули К.Е. Шеннона для кількості інформації й інформаційної ентропії. Звернемо увагу на кількість відомостей, що припадають на один елемент повідомлення  $H_i = -I/n$ . Кількість відомостей, що припадають на один елемент повідомлення  $H_i$ , – величина невід'ємна й обмежена, тобто  $H_i > 0$ . Ентропія дорівнює нулю, якщо інформація заздалегідь відома.

Отже, інформаційна ентропія слугує мірою вимірювання (зменшення) невизначеності повідомлення про стан даної конструкції, що описується ймовірностями  $P_1, P_2, \dots, P_n$  появи дефектів  $R_1, R_2, \dots, R_n$ .

Значний інтерес для наших досліджень має чотириступінчаста формула, що враховує чотири характерних стани конструкцій. Формула має такий вигляд:

$$\sum P_i = 1 \text{ при } H_4 = -P_1 \log_2 P_1 - P_2 \log_2 P_2 - P_3 \log_2 P_3 - P_4 \log_2 P_4.$$

де:  $P_1, P_2, P_3, P_4$  – імовірності руйнування при різних ступенях;  $P_1 \log_2 P_1, P_2 \log_2 P_2, P_3 \log_2 P_3, P_4 \log_2 P_4$  – внесок у зниження невизначеності, відповідно чотири стадії технічного стану конструкцій, як заходи руйнування всієї конструкції при  $\sum P_i = 1$ .

Урахуємо ще раз дві принципові властивості. Перша властивість – це локальність руйнування елементів. Друга властивість – це багатоступінчастий вид пошкодження (перехід стану конструкцій у різні рівні).

Графік на рис.13 характеризує зростання ступеня невизначеності технічного стану елементів досліджуваного об'єкта залежно від значень технічного стану об'єкта в даний момент часу й по суті є законом регресії надійності об'єкта. Для практичного застосування теоретична крива (рис.13) для всіх груп об'єктів поверхні,



буде розділена на чотири лінійні ділянки, на стику яких швидкість ентропії стрибкоподібно змінюється. Відомо, що всяка зміна ентропії інформує про зміну технічного стану об'єкта. Дослідження надійності об'єктів різного терміну експлуатації й подальший аналіз результатів цих досліджень дозволили прийняти рішення про розташування граничних точок (порогових значень дефектності).

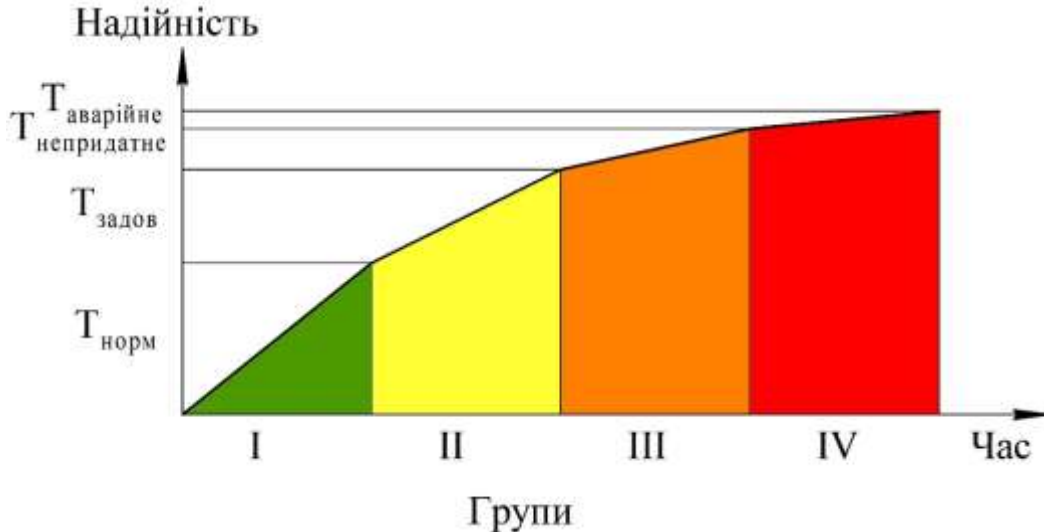


Рис. 13. Зростання ступеня невизначеності технічного стану елементів досліджуваного об'єкта в часі

При перевищенні об'єктом граничної дефектності швидкість росту інформаційної ентропії сповільнюється, що означає перехід об'єкта в небезпечний стан. Таким станом може бути тільки аварійний, при якому в елементах конструкцій з'являються дефекти, які є передвісниками аварії. В аварійному стані несуча здатність об'єкта чинити опір непроєктним впливам знижується, а з подальшим зростанням дефектності повністю вичерпується.

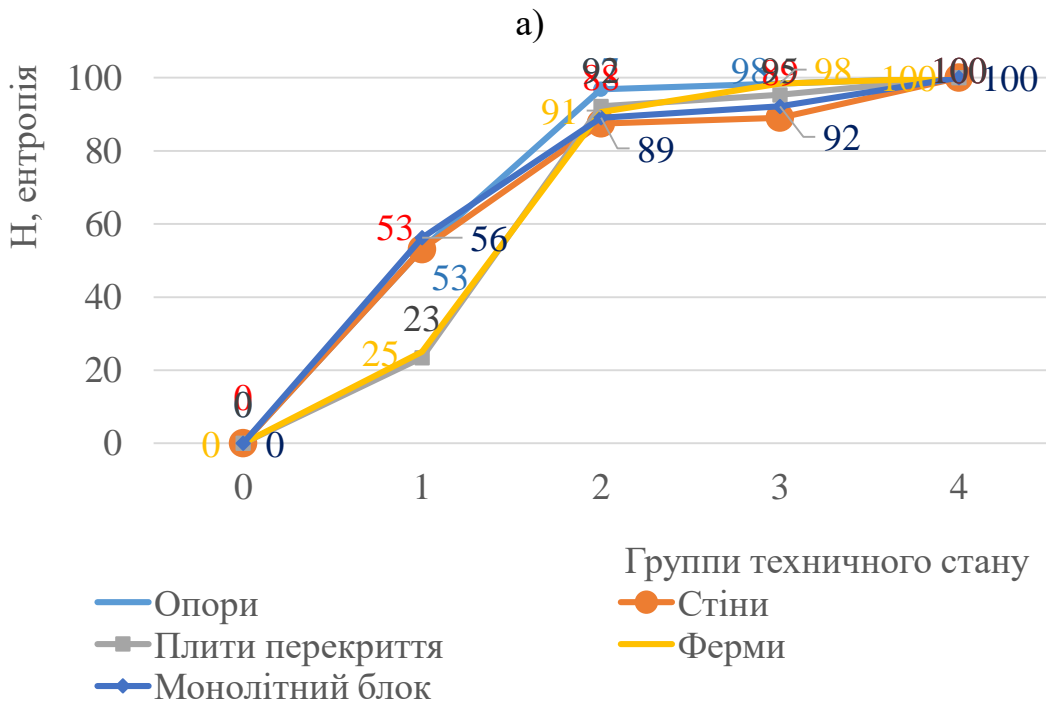
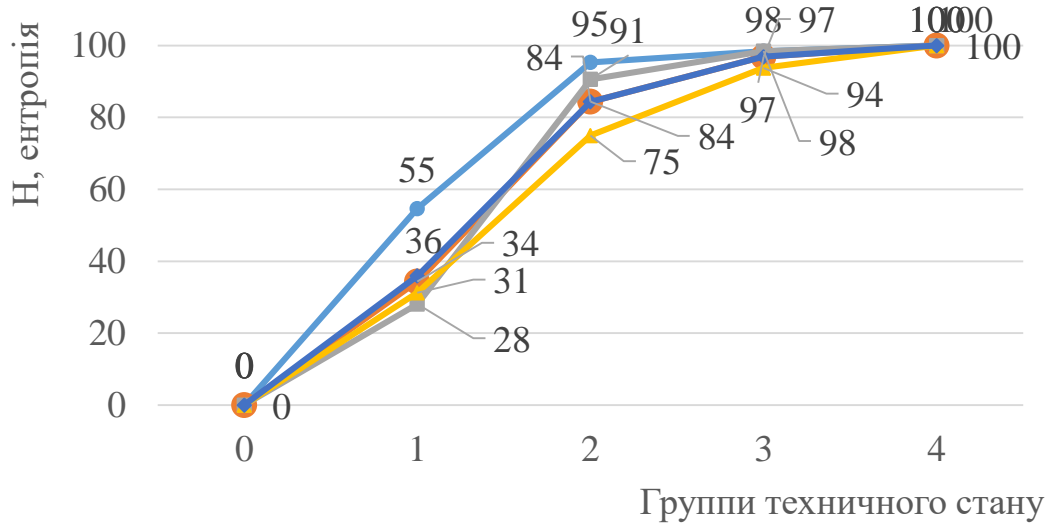
При досягненні об'єктом граничного значення дефектності максимальним стає не тільки ступінь невизначеності технічного стану будівлі, але й величина його конструкційного зносу. Несуча здатність об'єкта чинити опір будь-яким навантаженням теоретично вичерпується, а зростання інформаційної ентропії практично припиняється. Це означає, що об'єкт знаходиться в аварійному стані, при якому настання аварії об'єкта стає непередбачуваним.

Стандартні значення дефектності  $R_{norm}$ ,  $R_{sat}$ ,  $R_{uns}$  і  $R_{crash}$  є сталими, вони не залежать ні від конструктивного типу будівлі, ні від його поверховості.  $R_{norm}$  і  $R_{crash}$  утворюють нижню й верхню межі прийнятних значень надійності об'єкта. Поки фактична надійність залишається всередині цього коридору, рівень безпеки об'єкта слід уважати задовільним.

Час експлуатації об'єкта з моменту закінчення його введення в експлуатацію до досягнення задовільної дефектності  $R_{sat}$  визначає початковий термін безпечного ресурсу об'єкта. При досягненні об'єктом непридатної до експлуатації дефектності  $R_{uns}$  його фізичний знос складає понад 50%. Далі дефектність продовжує

зростати й досягає наступного граничного (аварійного) значення, яке дорівнює  $R_{crash}$ , що визначає граничний ресурс цього об'єкта.

Далі було проведено дослідження за розглянутими раніше групами об'єктів (рис 14).



б)

Рис. 14. Швидкість ентропії в елементах конструкцій при зміні технічного стану для копра (а) й галереї (б)

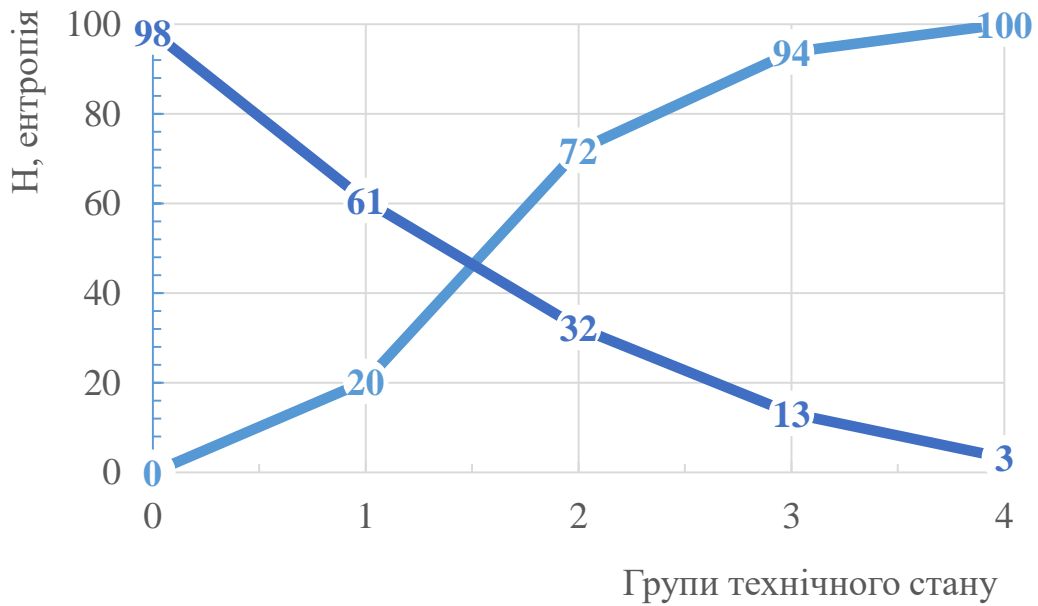


Рис. 15. Графічне подання визначення граничних станів в елементах копра для прийняття рішення

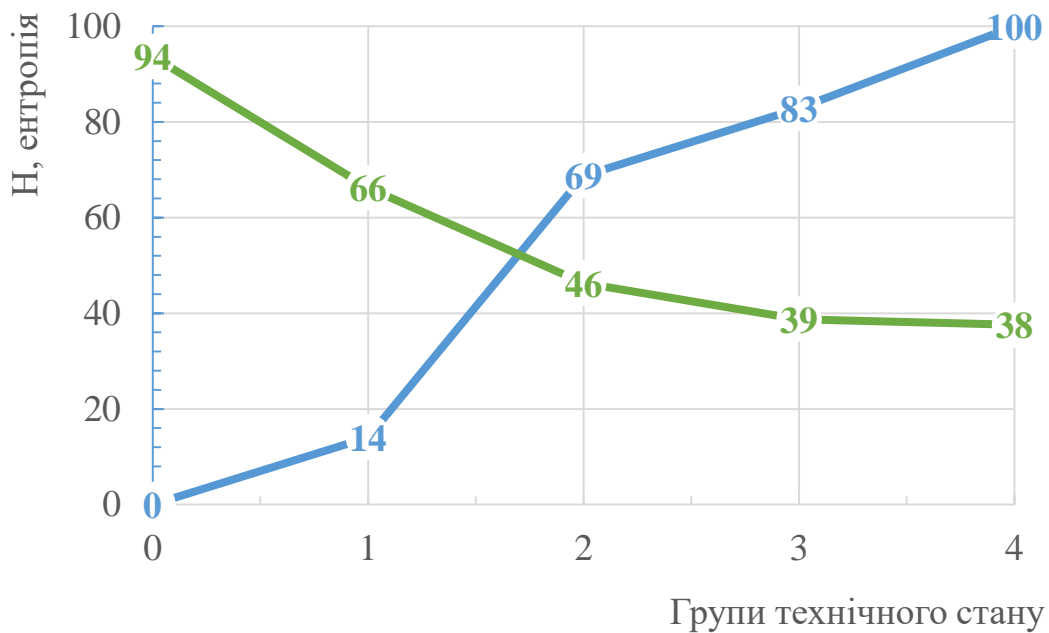


Рис. 16. Графічне подання визначення граничних станів в елементах галереї для прийняття рішення

Точка прийняттого порогового рівня, перетин залежності зміни дистанції Кульбака-Лейблера під дією процесів корозії із залежністю швидкості ентропії в елементах об'єкта загалом при зміні технічного стану об'єкта сигналізує про початок незворотних дефектних процесів в елементах конструкцій (рис. 15-16). Знання групи технічного стану об'єкта дозволяє прийняти управлінське рішення щодо терміну проведення на ньому ремонтно-відновлювальних заходів.

Запропонована технологія оцінювання конструкційної безпеки будівель, що експлуатуються, використовується на практиці для оцінювання надійності, виду технічного стану та безпечного залишкового ресурсу.

**Шостий розділ** дисертації присвячено визначенню надійності конструкцій промислових об'єктів на поверхні шахт.

У результаті раптового впливу (вимкнення елемента, додаткового зв'язку) елементи гірничотехнічних об'єктів, що залишилися неушкодженими, також відчувають більш інтенсивний вплив. У не зруйнованих від раптового впливу елементах зростають деформації й напруження у вузлах. У запроектованих елементах конструкцій об'єктів поверхні, залежно від рівня діючого на них проектного навантаження, можуть виникнути порушення граничних вимог.

Невиконання граничних вимог (сплеск деформацій і напружень у перерізах елемента) призведе до деякого інтегрального результату пошкоджень елементів об'єктів на поверхні шахт й, отже, до зміни їх залишкового ресурсу або руйнування.

Схема руйнування може бути локальною або викликати повне руйнування всієї будівлі або споруди на поверхні шахт. Проведення попереднього аналізу, як доповнення до основних положень розрахунку за граничними станами з розв'язуванням завдань надійності, дозволить забезпечити максимальне зниження шкоди при аварійних ситуаціях, обмежуючи його локальними, а не повними руйнуваннями.

Якісне оцінювання надійності або ступеня руйнування конструктивної системи в першому наближенні можна виконувати за допомогою деякого узагальненого параметра. Пропонується ввести коефіцієнт конструктивної безпеки системи в станах  $C^S$  (constructive security), викликаних аварійними раптово доданими навантаженнями.

Для числового оцінювання надійності  $i$ -го конструктивного елемента системи введемо параметр  $C_i^d$  (durability – довговічність), що характеризується відношенням граничного для даного елемента узагальненого зусилля  $M_{ipr}$  до зусилля в ньому від сумарного дії експлуатаційного навантаження й раптового аварійного впливу  $M_{izn}$

$$C_i^d = M_{ipr} / M_{izn},$$

У разі руйнування елемента конструктивної системи його надійність дорівнює нулю. Для запобігання руйнуванню елемента його необхідно посилити до рівня, що задовольняє критерій неруйнування й відповідно призведе до збільшення витрати матеріалу.

Імовірне оцінювання ступеня руйнування конструктивної системи в першому наближенні можна виконувати за допомогою коефіцієнта конструктивної безпеки системи  $C^S$ , значення якого можна визначити як відношення математич-

ного очікування  $R_i$  несучої здатності для даного елемента до узагальненого навантаження  $\Omega_i$ , обчисленого від сумарної дії експлуатаційного та миттєвого аварійного навантаження:

$$C^S = \frac{\overline{R_i}}{\Omega_i}$$

Якщо  $C^S = 1$ , то при описовому аналізі надійності ймовірність неруйнування елемента приймаємо такою, що дорівнює 0,5. Якщо  $C^S > 1$ , то ймовірність неруйнування елемента приймаємо такою, що дорівнює  $0,5 C^S$  зі зміщенням в право. У разі  $C^S < 1$  призначаємо ймовірність неруйнування елемента, що дорівнює  $0,5 C^S$  зі зміщенням в ліво

**Сьомий розділ** дисертації присвячено розробленню програмного комплексу зберігання, переробки й визначення прогнозованого ресурсу об'єктів в умовах недостатньої інформації технічного стану.

Традиційні методики проведення обстеження можуть виявитися безсилими в умовах перевірки вже наявної конструкції, коли конструктивне рішення не можна пристосувати до розрахункової моделі. Досить типовою для розв'язання зазначеної проблеми є експертне оцінювання.

Використання розроблених під час досліджень моделей для забезпечення прийняття проектних рішень дозволяє створити систему моніторингу стану будівель та споруд на поверхні шахт.

Призначення системи моніторингу полягає у наступному:

своєчасне оповіщення про критичні зміни стану конструкцій об'єкта й забезпечення прийняття правильних рішень;

моніторинг і реєстрація протягом усього терміну експлуатації змін стану конструкцій унаслідок накопичення в них експлуатаційних дефектів, які з плином часу можуть призвести будівлю або споруду в граничний стан, що вимагає проведення ремонтно-відновлювальних робіт або припинення експлуатації.

Мета системи – зниження ризику втрати конструкцією властивостей, що визначають її надійність за допомогою своєчасного виявлення на ранній стадії негативної зміни напружено-деформованого стану несучих конструкцій, яке може призвести до руйнування й людських втрат, переходу будівлі, споруди в не придатний до експлуатації й далі в аварійний стан, до повної або часткової втрати несучої здатності.

Пошук шляхів і оцінювання можливості реалізації вимог до системи моніторингу можуть здійснюватися методом експертних оцінок, іншими подібними методами й повинні бути спрямовані на визначення основних варіантів структур систем моніторингу. У ході цих робіт повинна бути оцінена можливість практичної реалізації, визначено критерії оцінювання небезпеки зміни стану несучих конструкцій, критерії оцінювання стану несучих конструкцій, системи показників і способи їх отримання, а також способи реалізації відповідних оцінок у ході функціонування системи моніторингу.

Отже, одним із шляхів забезпечення безпеки експлуатації об'єктів поверхні шахт можливе використання системи обліку, аналізу та прогнозування технічного стану (рис. 17). Це дозволить забезпечити оперативний контроль стану об'єкта, знизити ризик виникнення надзвичайних ситуацій та відповідно забезпечить його безпечну експлуатацію.



Рис. 17. Система моніторингу та забезпечення надійності елементів будівель і споруд поверхневого комплексу

## ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі вперше встановлених закономірностей появи дефектів і їх розвитку в результаті різного роду процесів накопичення пошкоджень, зносу несучих конструкцій будівлі від величини ентропії, розробленого нового підходу до оцінювання поширення дефектів і визначення рівнів результатів діагностування отримано рішення актуальної наукової проблеми забезпечення прогнозування і визначення надійності елементів будівель і споруд поверхневого комплексу в умовах недостатньої інформації про їх технічний стан, що полягає в розробці системи комплексного моніторингу, контролю, діагностики та прогнозування технічного стану елементів конструкцій на об'єктах шахтної поверхні.

Основні наукові та практичні результати, висновки та рекомендації, що отримано в дисертації.

1. Аналіз досвіду експлуатації й сучасного стану об'єктів поверхневого комплексу показав, що подальший їх розвиток пов'язаний із розв'язанням таких проблем, як забезпечення ефективного керування та підвищення технічної безпеки, що може бути виконано за допомогою розробки й застосування системи комплексного моніторингу, яка дозволяє проводити контроль, діагностику та прогнозування технічного стану елементів конструкцій на об'єкті. Кожен із функціоналів цієї системи ґрунтується на базах даних, які мають єдину організацію та структуру і є сховищем усієї інформації про об'єкти; на наборі програмних модулів для отримання оцінок за раніше розробленим алгоритмам.

2. Запропоновано більш зручний, з практичного погляду, спосіб подання результатів виконання робіт у вигляді статистичних даних із урахуванням математичного моделювання можливих дефектів.

3. Уточнено порогові рівні результатів діагностування, що дозволяє модифікувати прийняті правила про призначення груп технічного стану об'єкта загалом.

4. Встановлено, що розвиток дефектів більше залежить від величини їх початкового стану дефекту, ніж від величини навантаження. Отримано залежності, що характеризують розвиток напружено-деформованого стану в елементах конструкцій складних об'єктів поверхні шахт. При корозії в 50-60% відбуваються істотні зміни в елементах конструкцій. Зменшення маси призводить до зменшення зусиль від статичного навантаження й виходу з ладу елементів конструкцій при корозії в 70-80%. Достовірність отриманих результатів підтверджується задовільною збіжністю (близько 90%) аналітичних, експериментальних і натурних досліджень.

5. Виконано дослідження аварій і відмов елементів конструкцій споруд поверхні. У результаті встановлено залежність появи дефектів або їх розвитку в результаті процесів накопичення пошкоджень різного роду. Через наявність великої кількості однотипних елементів конструкцій в спорудах доведено можливість застосування сімейства степеневих законів розподілення. У роботі враховано, що в складних системах відмова хоча б одного їх елемента може призвести до відмови системи загалом.

6. Запропонована ймовірнісна модель і реалізований на її основі метод діагностування дозволяють побудувати методику розрахунку фізичного зносу на основі ймовірнісного підходу. Використання даної моделі дало можливість визначити параметри рівнянь із використанням принципів регресійного аналізу. Це дозволило отримати залежність, яка характеризує проміжок часу до руйнування певного дефекту при різних значеннях виникаючих навантажень.

7. У розрахунках елементів системи з  $n$  конструктивних елементів, кожен з яких має функцію розподілення часу безвідмовної роботи, обробку статистичних даних можна виконувати із застосуванням Байєсового методу, коли вся невизначеність зосереджена в параметрі надійності. Спочатку цей параметр має апріорне розподілення, а після дослідження елементів конструкції і надходження емпіричної інформації розподілення змінюється на апостеріорне, яке є характеристикою надійності елемента конструкції об'єкта, що формує експлуатаційну надійність всієї системи.

8. Із використанням методів теорії інформації встановлено залежність зносу несучих конструкцій будівлі від величини ентропії. Аналітичними дослідженнями встановлено порогові значення ентропії, при досягненні яких будівля переходить у якісно інший стан, що дозволяє поставити й розв'язати задачу процедури прийняття рішень про стан елементів, групи елементів і об'єкта загалом.

9. Розроблено моделі прийняття рішень про стани об'єктів за групами, створено методологію побудови багаторівневої діагностики, яка дозволяє оцінювати стан конструкцій на кожному рівні елементів; надано графічну інтерпретацію моделі регресії надійності об'єкта.

10. Розроблено методику визначення параметрів надійності елементів конструкцій об'єктів поверхні в станах, не передбачених проектом, – від експлуатаційного навантаження й раптового аварійного впливу. Це забезпечує чітку інтерпретацію та взаємозв'язок елементів розв'язуваної задачі як усередині алгоритму, так і у разі потреби виходу на зовнішні стандартні програми при розрахунку конструкцій досліджуваних систем у позамежних станах.

11. Запропонована методика оцінювання конструкційної безпеки експлуатованих будівель може бути використана на практиці для оцінювання ступеня надійності, виду технічного стану та безпечного залишкового ресурсу. Інформація про безпечний залишковий ресурс об'єкта дозволяє прийняти управлінське рішення щодо терміну проведення на ньому ремонтно-відновлювальних заходів.

12. Розрахунковий економічний ефект від впровадження докторської дисертаційної роботи по ряду підприємств становить ПАТ «СУХА БАЛКА» 120,0 тис. грн на рік; ПАТ «Кривбасзалізрудком» 135,0 тис. грн на рік; СП ПАТ "ММК ім. Ілліча" ГЗК "Укрмеханобр" 235,0 тис. грн на рік; ДП "ДП "Кривбаспроект" 249 643, 30 грн на рік; ДП «Схід ГЗК» 223 611,50 грн.



**Результати роботи і положення дисертації відображені у 61 науковій праці, основними з яких є наступні:**

1. Бровко Д. В. Опыт строительства башенных копров рудных и угольных шахт: монография / Д. В. Бровко, С. А. Жуков, А. Г. Лидневич. – Кривой Рог: Минерал, 2003. – 221 с.
2. Эффективная отработка руд в условиях техногенеза недр: монография / Д. В. Бровко, Б. Н. Андреев, Н. И. Ступник и др. – Кривой Рог: Дионис, 2012. – 233 с.
3. Бровко Д. В. Повышение устойчивости башенных копров / С. А. Жуков, Д. В. Бровко, В. Ю. Огороков // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2003. – Вип. 2. – С. 119–121.
4. Бровко Д. В. Надшахтные копры – практика и усовершенствование их проектирования / Д. В. Бровко, В.В. Хворост // Разработка рудных месторождений: респ. межвед. научн.-техн. сб. – Кривой Рог: КТУ, 2007. – Вып. 91. – С. 83 – 87.
5. Бровко Д. В. Аналіз стану рудникових естакад на поверхні гірничодобувних підприємств / Д. В. Бровко // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2006. – Вип. 14. – С. 37– 41.
6. Бровко Д. В. Удосконалення проектування копрових споруд / Д. В. Бровко, В.В. Хворост // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2009. – Вип. 24. – С. 42 – 46.
7. Бровко Д. В. Реконструкція галерей за умови переходу на полегшені огорожуючі конструкції / Д. В. Бровко, Н. І. Посмашна, В. В. Хворост // Вісник Криворізького технічного університету, Кривий Ріг. – 2010. – Вип. 25. – С. 53 – 56.
8. Бровко Д. В. Динамика транспортных галерей горнодобывающих предприятий / Д. В. Бровко, Б. М. Андреев, В. В. Хворост // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – Вип. 34, Т.1. – С. 88–93.
9. Бровко Д. В. Научный подход в оценке надежности эксплуатируемых объектов поверхности горнопромышленного комплекса / Д. В. Бровко, Б. М. Андреев // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2012. – Вип. 31. – С. 41 – 46.
10. Бровко Д. В. Анализ оснований для динамического расчета зданий и сооружений в поверхностном комплексе шахт горнодобывающих предприятий / Д. В. Бровко, Н. І. Посмашна, В. В. Хворост // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2012. – Вип. 31. – С. 46 – 50.
11. Бровко Д. В. Научные основы технического диагностирования и прогнозирования состояния несущих элементов зданий и сооружений горнопромышленного комплекса / Д. В. Бровко, К. А. Агатьев // Гірничий вісник: науково-техн. зб.– Кривий Ріг: КНУ, 2013. – Вип. 96 (1). – С. 80 – 85.

12. Бровко Д. В. Урахування технічного стану конструкцій і елементів промислових будівель та споруд, що реконструюються, для визначення терміну наступного обстеження і паспортизації / Д. В. Бровко // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2013. – Вип. 35. – С. 26–30.
13. Бровко Д. В. Оценка риска надежности конструкций эксплуатируемых объектов горнопромышленного предприятия / Д. В. Бровко, Б. Н. Андреев, В. В. Хворост // Сборник научных трудов: БНТУ, Минск, 2013. – Т.1. – С. 180–190.
14. Бровко Д. В. Перспективы поддержания производственных мощностей шахт и карьеров Кривбасса / Д. В. Бровко, Б. Н. Андреев, С. В. Письменный // Сборник научных трудов: Известия Тульского государственного университета. – Тула, 2013. – С. 115 – 120.
15. Бровко Д. В. Исследования надежности промышленных объектов поверхности горных предприятий / Д. В. Бровко // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2014. – Вип. 36. – С. 32–36.
16. Бровко Д. В. К вопросу оценки риска надежности конструкций эксплуатируемых объектов горнопромышленного предприятия / Д. В. Бровко, Б. М. Андреев, В. В. Хворост // Вісті Донецького гірничого інституту. – Красноармійськ, 2014. – Вип. 1(34) – 2(35). – С. 125 – 132.
17. Brovko D.V. Determination of reliability and justification of object parameters on the surface of mines taking into account change-over to the lighter enclosing structures / D. V. Brovko, B. N. Andreev, V. V. Khvorost // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 7(12). – P. 378 – 382. (Наукометрична база **Scopus**).
18. Бровко Д. В. Визначення надійності та обґрунтування параметрів об'єктів на поверхні шахт з урахуванням переходу на полегшені огороджувальні конструкції / Д. В. Бровко, Б. М. Андреев, В. В. Хворост // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – Вип. 6. – С. 86 – 91.
19. Бровко Д. В. Забезпечення надійності поверхневого комплексу методом прогнозування технічного стану елементів будівель і споруд / Д. В. Бровко, Б. М. Андреев, В. В. Хворост // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2016. – Вип. 41. – С. 87 – 92. (Наукометрична база **Index Copernicus**)
20. Brovko D.V. Prediction and ensuring the reliability of buildings elements and structures of surface complex at reconstruction / D. V. Brovko, B. M. Andreev, V. V. Khvorost // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. –N.9. – P. 54 – 57. (Наукометрична база **Index Copernicus**).
21. Бровко Д. В. Аналіз технічного та динамічного стану галерей на гірничих підприємствах Кривбасу / Д. В. Бровко, В. В. Хворост // Збірник наукових праць Науково-дослідного гірничорудного інституту Державного ВНЗ “Криворізький національний університет”. – Кривий Ріг, 2016. – С. 87-92.
22. Brovko D. V. System analysis of the accident risk of surface mining objects as a basis for their safe operation [Електронний ресурс] / D. V. Brovko, V. V. Khvorost // Computer Science, Information Technology, Automation. – 2017. – Режим доступу

до ресурсу: <http://csita.com.ua/wp-content/uploads/2019/06/6.5.pdf>. (Наукометрична база **Index Copernicus**).

23. Бровко Д. В. Обеспечение безопасности объектов поверхности шахт путем корректировки уровней надежности / Д. В. Бровко, В. В. Хворост // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2017. – Вип. 45. – С. 89 – 93. (Наукометрична база **Index Copernicus**).

24. Brovko D. V. Providing safety for mine surface objects by upgrading of the reliability level / [Електронний ресурс] / D. V. Brovko, V. V. Khvorost // Computer Science, Information Technology, Automation. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: [http://csita.com.ua/wp-content/uploads/2019/02/10\\_6.pdf](http://csita.com.ua/wp-content/uploads/2019/02/10_6.pdf) (Наукометрична база **Index Copernicus**).

25. Brovko D. Development of complex-structure ore deposits by means of chamber systems under conditions of the Kryvyi Rih iron ore field / D. Brovko, S. Pysmennyi, N Shwager, D. Paraniuk, O. Serdiuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – No. 5(1 – 95). – P. 33 – 45. (Наукометрична база **Scopus**).

26. Brovko D. V. Qualimetric assessment in calculation of the survivability level of the mine surface objects / D. V. Brovko, V. V. Khvorost, V. Yu. Tyshchenko // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2018. – No. 4. – P. 66 – 71. (Наукометрична база **Scopus**).

27. Brovko D. V. Safe operation of surface objects / D. V. Brovko, V. V. Khvorost, V. Yu. Tyshchenko // Гірничий вісник: науково-техн. зб. – Кривий Ріг: КНУ, 2018. – Вип. 103. – С. 217–222.

28. Бровко Д. В. Построение моделей возможных дефектов объектов поверхности шахт в виде анализа статистических данных их технических осмотров / Д. В. Бровко, В. В. Хворост // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2017. – Вип. 47. – С. 32 – 38.

29. Brovko D. V. Reliability correction when determining safe operation of mine surface objects related to the basic production process / D. V. Brovko, V. V. Khvorost, V. Yu. Tyshchenko // Гірничий вісник: науково-техн. зб. – Кривий Ріг: КНУ, 2019. – Вип. 105. – С. 14 – 18.

30. Brovko D. Augmented reality in training engineering students: Teaching methods. / D. Brovko, Y. Yechkalo, V. Tkachuk, T. Hrunтова, V. Tron // CEUR Workshop Proceedings. 2393. – 2019. – P. 952-959. (Наукометрична база **Scopus**).

31. Brovko D. V. Evaluation of particle density of pulp solid phase using gamma-ray and Lamb waves measuring channels / V. S. Morkun, N. V. Morkun, D. V. Brovko, V. V. Tron, D. I. Paranyuk, A. Y. Serdyuk // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2019. – No. 330(2). – P. 19 – 33. (Наукометрична база **Scopus**).

32. Бровко Д. В. Анализ состояния металлических сооружений на шахтах / Д. В. Бровко, В. В. Хворост // Перспективи освоєння підземного простору: матеріали 2-ї міжнар. наук.-практ. конф. молодих учених, аспірантів та студентів, 23-25 квіт. 2008 р. – Дніпро: НТУ "Дніпровська політехніка", 2008. – С. 56 – 58.
33. Бровко Д. В. Исследование состояния копровых сооружений / Д.В. Бровко, В. В. Хворост // Совершенствование технологии строительства шахт и подземных сооружений: материалы междунар. науч. - техн. конф., 7-9 апр. 2008 г. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – С. 97 – 98.
34. Бровко Д. В. Переваги та недоліки реконструкції галерей гірничодобувних підприємств / Д. В. Бровко, В. В. Хворост // Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку-2010: матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 25-26 трав. 2010 р. – Кривий Ріг: КТУ, 2010. – С. 27 – 28.
35. Бровко Д. В. Анализ методов оценки качества строительно-монтажных работ, применяемых при проектировании реконструкции горнотехнических зданий и сооружений / Д. В. Бровко, Б. М. Андреев // Форум гірників – 2010: матеріали міжнар. конф., 21-23 жовт. 2010 р. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – С. 137 – 142.
36. Brovko D. V. Globalna aspekty Ekonomii Światowej i Stosunków Międzynarodowych w warunkach niestabilności gospodarczej / D. V. Brovko, B. N. Andreev, V. V. Khvorost // Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Praktycznej, Częstochowa, Akademia polonijna, 31 бер.-1 квіт. 2016 р. – 897 s.
37. Бровко Д. В. Анализ риска возникновения дефектов сооружений на поверхности шахт как основа управления их безопасной эксплуатацией / И. А. Нестеренко, В. В. Хворост, Д. В. Бровко // Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 25-27 трав. 2016 р. – Кривий Ріг: КНУ, 2016. – С. 83.
38. Бровко Д. В. Динаміка конструкцій об'єктів гірничодобувних підприємств як одна з складових визначення їх технічного стану / Д.В. Бровко // Стратегія якості у промисловості і освіті: матеріали XII Міжнар. конф., 30 трав. - 2 черв. 2016 р. – Варна, 2016. – С. 53 – 57.
39. Бровко Д. В. Оценка надежности технического состояния промышленных объектов на поверхности шахт / Д. В. Бровко, В. В. Хворост // Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК: матеріали IV міжнар. наук. -практ. конф., 23-24 лист. 2017 р., Кривий Ріг: КНУ, 2017. – С. 31.
40. Бровко Д. В. Safe operation of surface objects by analyzing the causes of emergency situations occurrence / Д. В. Бровко, В. В. Хворост // Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід: матеріали міжнар. конф., 21-24 лист. 2017 р. – Відень, 2017. – Т. 2. – С. 180 – 186.

**Особистий внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві:**

[1-3] – розробка методології досліджень, створення чисельних моделей, виконання розрахунків та аналіз результатів; [4, 6, 9, 11, 28] – формулювання ідеї та розробка основ проектування об'єктів шахтної поверхні із урахуванням математичного моделювання можливих дефектів; [8, 10, 17, 18, 19, 37, 39] – моделювання характеристик надійності промислових об'єктів на поверхні шахт; [13, 16, 25, 36, 30, 31] – формулювання ідеї та постановка завдання досліджень, узагальнення та аналіз результатів; [7, 21, 24, 38, 40] – постановка завдання для динамічного аналізу, формулювання принципів комплексного аналізу, обробка результатів, визначення закономірностей; [26, 32, 34, 35] – аналіз результатів обстежень, розробка методики розрахунку параметрів надійності в процесі експлуатації; [20, 22, 23, 27, 29, 33] – створення чисельних моделей, розробка критеріїв та аналіз результатів.

**АНОТАЦІЯ**

**Бровко Д.В. Прогнозування надійності будівель і споруд поверхневого комплексу шахт в умовах недостатньої інформації про їх технічний стан. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.15.04 – «Шахтне та підземне будівництво». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої наукової проблеми в області безпечної експлуатації будівель поверхні шахт, а саме розвитку теоретичних основ та методики прогнозування надійності елементів будівель і споруд поверхневого комплексу шахт в умовах недостатньої інформації про їх технічний стан з використанням математичного апарату та імовірнісно-статистичних методів технічної діагностики.

Уперше встановлено закономірності появи дефектів і їх розвитку в результаті різного роду процесів накопичення пошкоджень при великій кількості елементів конструкцій та встановлено залежності зносу елементів конструкцій будівлі від величини ентропії.

На основі комплексного аналізу проведених досліджень запропоновано нову концепцію керування конструкційною безпекою гірничотехнічних об'єктів, в основу якої покладено критерії оцінювання їх стійкого стану – параметр конструктивної безпеки системи й надійність елементів у часі – для попередження катастрофічних і важких наслідків при експлуатації.

**Ключові слова:** будівлі та споруди поверхні шахт, елементи конструкцій, технічний стан, накопичення пошкоджень, моделювання дефектів, надійність гірничотехнічних об'єктів, безпечна експлуатація.

## АННОТАЦИЯ

**Бровко Д.В. Прогнозирование надежности зданий и сооружений поверхностного комплекса шахт в условиях недостаточной информации об их техническом состоянии. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.15.04 – «Шахтное и подземное строительство» – Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, 2019.

Диссертация посвящена решению важной проблемы в области безопасной эксплуатации зданий поверхности шахт, а именно развития теоретических основ и методики прогнозирования надежности элементов зданий и сооружений поверхностного комплекса шахт в условиях недостаточной информации об их техническом состоянии с использованием математического аппарата и вероятностно-статистических методов технической диагностики.

Впервые установлены закономерности появления дефектов и их развития в результате различного рода процессов накопления повреждений при большом количестве элементов конструкций и установлены зависимости износа конструкций здания от величины энтропии.

Разработана методика оценки и анализа надежности промышленных сооружений с учетом представления результатов выполнения работ в виде статистических данных на основе математического моделирования возможных дефектов и предложен новый подход определения уровней состояния объекта за результатами диагностирования. Мерой оценки надежности элементов эксплуатируемых зданий и сооружений поверхностного комплекса предложено использовать дивергенцию Кульбака-Лейблера.

Разработана новая модель определения надежности элементов конструкций объектов поверхности в состояниях, не предусмотренных проектом, от эксплуатационной нагрузки и внезапного аварийного воздействия. Исследованиями установлены пороговые значения энтропии, при достижении которых здание переходит в качественно иное состояние, что позволяет оперативно контролировать пороговые значения дефектности, при достижении которых объект переходит в качественно иное состояние.

На основе комплексного анализа проведенных исследований предложена новая концепция управления конструкционной безопасностью горнотехнических объектов, в основу которой положены критерии оценки их устойчивого состояния – параметр конструктивной безопасности системы и надежность элементов во времени – для предупреждения катастрофических и тяжелых последствий при эксплуатации.

Расчетный экономический эффект от внедрения докторской диссертационной работы по ряду предприятий составляет от 120 000,0 грн в год до 249 643,3 грн в год.

**Ключевые слова:** здания и сооружения поверхности шахт, элементы конструкций, техническое состояние, надежность горнотехнических объектов, безопасная эксплуатация.

**ABSTRACT**

**Brovko D.V. Prediction of the reliability of buildings and structures of the surface complex of mines in terms of inadequate information about their technical condition. - Qualification work on the rights of manuscript.**

The thesis for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.15.04 – «Mine and underground construction». – National Technical University «Dnipro Polytechnic», Dnipro, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the important problem in the safe operation of mine surface buildings, namely the development of theoretical bases and methods for predicting the reliability of elements of buildings and structures of the surface complex of mines in terms of inadequate information about their technical condition using mathematical apparatus and probabilistic-statistical methods of technical diagnostics.

For the first time, the regularities of the appearance and development of defects caused by accumulated damages with a large number of structural elements were established, the dependences of wear of the building supporting structures on the value of entropy were estimated.

A new concept of structural safety management of mining facilities was proposed on the basis of a comprehensive analysis of the conducted research. The concept is based on the criteria for assessing their stable state like a parameter of the structural safety system and the reliability of the elements in time, and enables to prevent disastrous effects during operation.

**Key words:** mine surface buildings and structures, structural elements, technical condition, damage accumulation, defect modeling, reliability of mining facilities, safe operation.

**БРОВКО Дмитро Вікторович**

**ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД  
ПОВЕРХНЕВОГО КОМПЛЕКСУ ШАХТ В УМОВАХ НЕДОСТАТНЬОЇ  
ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЇХ ТЕХНІЧНИЙ СТАН  
(Автореферат)**

Здано на складання 30.10.2019. Підписано до друку 31.10.2019.

Формат 60×84/16. Ум. др. арк. – 2,1. Авт. арк. – 1,9.

Тираж 100 прим. Зам. №277

Друкарня ФОП О. А. Бурова

мкр. Ювілейний, 10/104, м. Кривий Ріг, 50084

Свідоцтво ДП № 159-р від 26.03.13.