

**СЕЙСМОАКУСТИЧНИЙ ПРОГНОЗ І  
ОКРЕМІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЯВІВ  
ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ ПРИ  
ВІДПРАЦЮВАННІ ВУГІЛЬНИХ  
ПЛАСТІВ**

Монографія

**ГОЛОВКО Юрій  
Миколайович  
СДВИЖКОВА Олена  
Олександрівна  
КЛИМЕНКО Діна  
Володимирівна**

УДК 622.817.4

Г61

Рекомендовано до друку Вченою радою Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» як монографія для фахівців, наукових співробітників, спеціалістів у галузі геотехніки і геомеханіки, викладачів, аспірантів та здобувачів вищої освіти технічних вищих навчальних закладів (протокол №7 від 20.06.24).

**Рецензенти:**

**О.П. Круковський** – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, член-кореспондент НАН України, заступник директора з наукової роботи Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України;

**С.П. Мінєєв** – д-р техн. наук, професор, завідувач відділом керування динамічними проявами гірського тиску Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України;

**І.А. Ковалевська** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

**Головко Ю.М.**

**Г61** Сейсмоакустичний прогноз і окремі закономірності проявів газодинамічних явищ при відпрацюванні вугільних пластів / Ю.М. Головко, О.О. Сдвижкова, Д.В. Клименко; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: НТУ «ДП», 2024. – 151 с.

Монографія присвячена розв'язанню науково-практичної задачі підвищення безпеки гірничого виробництва, що направлена на підвищення точності прогнозу газодинамічних явищ шляхом використання встановлених закономірностей впливу коливального навантаження на стан тріщин у напруженому вуглепородному масиві та зв'язку характеристик згенерованого у масиві акустичного сигналу зі схильністю порід до раптового руйнування. Наукове значення полягає у встановленому зростанні амплітуди коливань в інтервалі частот 700 – 1400 Hz для різних гірських порід (дрібнозернистий пісковик, вапняк, кам'яне вугілля), що є небезпечним і провокує виникнення газодинамічних явищ. Це дозволило розробити схему прогнозу газодинамічних явищ з урахуванням часового аспекту перевищення показниками критичних значень та зі зниженням помилок першого роду.

© Ю.М. Головко, О.О. Сдвижкова,  
Д.В. Клименко, 2024.

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2024

*Висловлюємо щирі подяки вченим Шашенку О.М.,*

*Калугіній Н.О.,*

*Макеєву С.Ю.,*

*Солодянкіну О.В.,*

*Гапєєву С.М.,*

*Дубицькій М.С.,*

*що ця монографія «побачила світ»*

## ЗМІСТ

Вступ.....	5
<b>Розділ 1</b> Газодинамічні явища в шахтах і методи їх прогнозу.....	11
1.1 Газодинамічні явища: фактори, причини і наслідки їх виникнення при веденні гірничих робіт.....	11
1.2 Причини та механізм газодинамічних явищ.....	18
1.2.1 Напружено-деформований і газодинамічний стани гірського масиву в привибійній частині.....	19
1.2.2 Енергетична теорія виникнення газодинамічних явищ.....	22
1.2.3 Втрата стійкості рівноважного стану локальних зон гірського масиву.....	24
1.3 Способи прогнозу і запобігання газодинамічних явищ при веденні гірничих робіт.....	26
1.4 Акустичний контроль стану вугільних пластів.....	30
<b>Розділ 2</b> Динаміка гірського масиву й прогнозування його стану.....	29
2.1 Уявлення про природний напружений стан гірського масиву.....	41
2.2 Деформування та руйнування гірських порід з плином часу й в околі виробок.....	42
2.3 Умова розвитку тріщин.....	44
2.4 Тріщиностійкість гірських порід.....	46
2.5 Управління динамічним станом гірського масиву.....	53
2.6 Механізм руху тріщини у вуглепородному масиві.....	54
<b>Розділ 3.</b> Узагальнена умова старту тріщини, що ініційований коливаннями в породному напружено-деформованому середовищі.....	56
3.1 Умова старту тріщини при гармонійному навантаженні.....	56
3.2 Дослідження умови старту тріщини при постійній квазістатичній складовій напруження ( $\alpha=0$ ).....	62
3.3 Визначення області зміни параметрів, в якій можливий старт тріщини при змінній квазістатичній складовій напруження ( $\alpha \neq 0$ ).....	72
3.4 Дослідження умови старту при змінній квазістатичній складовій напруження ( $\alpha \neq 0$ ).....	83
3.5 Аналіз впливу частоти коливань на можливе зростання тріщин	

(оцінка критичних значень).....	87
<b>Розділ 4</b> Джерела хвильового руху в породному масиві. Реєстрація, обробка і аналіз складових акустичних сигналів, що відповідальні за ініціювання розвитку газодинамічних явищ.....	94
4.1 Утворення й поширення акустичних коливань у вуглепородному масиві.....	94
4.2 Апаратура, місце й порядок проведення сейсмоакустичних досліджень.....	102
4.3 Оцінка спектрів акустичних сигналів, що генеруються породоруйнівними механізмами.....	105
4.3.1 Спектральна оцінка сигналів, що виявлені у вуглепородному масиві.....	107
4.4 Дослідження впливу різних інтерференційних хвиль на характеристики реєстрованих коливань у вугільному пласті.....	110
<b>Розділ 5</b> Обґрунтування прогностичного показника і його застосування в апаратно-програмному комплексі для прогнозу газодинамічних явищ в шахтних умовах.....	125
5.1 Введення нового прогностичного показника на основі аналізу спектра сигналу.....	125
5.2 Схема використання двох критеріїв викидонебезпечності вуглепородного масиву.....	129
5.3 Застосування прогностичних показників газодинамічних явищ в апаратно-програмному комплексі.....	134
Список використаних джерел.....	143

## ВСТУП

Газодинамічні явища (ГДЯ) на шахтах та рудниках відомі в світі вже близько 250 років. Проблема боротьби з цими явищами залишається актуальною й в Україні, зокрема при підземному відпрацюванні газонасичених вугільних пластів. Необхідність прогнозувати, попереджати газодинамічні явища й запобігати їх негативним наслідкам призвела до розробки різних методів прогнозу викидонебезпечності на певних стадіях роботи в шахті.

Найбільш розповсюдженими у даний час є методи прогнозу газодинамічних явищ, що ґрунтуються на аналізі акустичних сигналів апаратурою типу АК-1, АК-1м, АПСС-1. Вказані методи призначені для безперервної оцінки ступеня напруженого стану вуглепородного масиву навколо виробки і базуються на активному зондуванні досліджуваної області акустичними сигналами, що генеруються в породному масиві механізмами, які працюють у вибої. Незважаючи на широке застосування даного методу, середній рівень надійності сейсмоакустичного прогнозу ГДЯ не перевищує 60 – 70%. Це пов'язано не тільки з недосконалістю і моральною застарілістю обладнання, але й з недостатньою обґрунтованістю критеріїв викидонебезпечного стану гірського масиву.

Відомо, які чинники призводять до виникнення динамічних форм прояву гірського тиску. Але уявлення про те, що відбувається у вуглепородному масиві під час руйнування, які саме фізичні процеси призводять до критичного стану масиву за короткий період розвитку руйнувань і як ці процеси пов'язані з поширенням пружних коливань в породному середовищі, розвинені недостатньо.

Тому теоретичне обґрунтування зв'язку характеристик акустичного сигналу, що йде крізь напружений породний масив, із схильністю порід до раптового руйнування та вдосконалення на цій основі методу прогнозу динамічних явищ є актуальним науковим завданням, вирішення якого дозволить підвищити безпеку гірничих робіт та ефективність підземного видобутку корисних копалин, зокрема вугілля.

Підвищенню достовірності сейсмоакустичного способу прогнозу раптових

газодинамічних явищ в шахтах шляхом формування прогностичних критеріїв на основі умов динамічного руйнування гірської породи присвячена ця монографія.

Запропонована умова прогнозу газодинамічних явищ. Для формулювання зазначеної умови використовувалася ідея, що полягає в сумісному урахуванні квазістатичної та гармонійної компонент напружень при використанні просторово-часового критерію руйнування порід та вугілля для оцінки впливу коливань різної частоти на можливість спонтанної ініціації тріщин у вуглепородному масиві та виникнення газодинамічних явищ.

У п'яти розділах монографії приділялася увага таким темам:

1. Аналіз існуючих механізмів і методів розрахунку параметрів процесів руйнування навколо виробок при раптових газодинамічних явищах.
2. Побудова математичної моделі старту (ініціації) тріщини в породному напружено-деформованому середовищі при сумісній дії квазістатичного та коливального навантажень.
3. Проведення аналітичних і чисельних досліджень впливу параметрів коливань і напруженого стану на процес розвитку тріщин.
4. Обробка акустичних сигналів, що зареєстровані в шахтних умовах при роботі різних породоруйнівних механізмів, і оцінка їх спектральних параметрів з позиції впливу на розвиток процесів руйнування навколо виробок, формування критеріїв викидонебезпечності вуглепородного масиву.
5. Ймовірна оцінка підвищення достовірності прогнозу газодинамічних явищ за рахунок зменшення помилок першого роду («хибне спрацювання») та другого («пропуск події») при впровадженні різних сценаріїв сумісного використання пропонованих прогностичних критеріїв. Розробка пропозицій щодо вдосконалення методу сейсмоакустичного прогнозу газодинамічних явищ в шахтах і порядку їх використання в апаратурі, що розробляється.

При дослідженні існуючих механізмів і методів розрахунку параметрів процесів руйнування навколо виробок при раптових газодинамічних явищах було використано методи аналізу та узагальнення літературних і статистичних даних.

Математична модель тріщини в породному напружено-деформованому середовищі при коливальному навантаженні базується на основних положеннях механіки суцільного середовища й теорії руйнування. При дослідженнях впливу параметрів коливань і напруженого стану на процес розвитку тріщин застосовано класичні методи математичного аналізу та чисельні методи рішення трансцендентних рівнянь. Реєстрація акустичних сигналів в шахтних умовах базувалася на п'єзоелектричному способі перетворення механічних коливань і подальшої дискретизації електричного аналогового сигналу. При спектральному аналізі сигналів використано швидке перетворення Фур'є. Аналіз структури реєстрованих сигналів використовує основні положення теорії хвильових процесів в шаруватих середовищах. При обґрунтуванні комплексного прогностичного показника й способу його використання в програмно-апаратному комплексі застосовано методи теорії ймовірностей і методи розробки алгоритмів.

У **першому розділі** наводиться огляд класичних і сучасних робіт за видами газодинамічних явищ, причин та механізму їх протікання, розглянуто існуючі на даний момент методи прогнозу газодинамічних явищ і широко використовуваний в даний час сейсмоакустичний метод прогнозу пластів, схильних до раптових викидів породи й газу. Вказані недоліки сейсмоакустичного методу й відповідно до запропонованого аналізом огляду робіт зроблено постановка проблеми дослідження, супутніх їй завдань дослідження та визначена мета роботи.

У **другому розділі** зроблено огляд робіт, в яких розглянуто різні підходи до умов старту тріщин, що є концентратором напружень в масиві. Відзначено залежність між значеннями коефіцієнта тріщиностійкості гірської породи і прикладеного зовнішнього навантаження при відповідній інтенсивності напружень біля вершини тріщини, коли відбувається старт тріщини в гірську породу. Відповідно до результатів оглядового матеріалу описано механізм руху тріщини у вуглепородному масиві.

У **третьому розділі** зроблено детальний аналіз узагальненої умови старту тріщини, що отримана на основі просторово-часового підходу до опису руйнування. Враховано квазістатичне і гармонійне напруження, що діють в околі



тріщини. Розглянуто такі режими навантаження в околі тріщини, в результаті яких довжини критичних тріщин змінюються стрибкоподібно (для деяких порід зменшуються майже в 3 рази). Проведено аналіз впливу частоти коливань на можливе зростання тріщин. Встановлена небезпека збільшення амплітуди коливань в деякому зазначеному інтервалі частот для конкретної гірської породи (дрібнозернистий пісковик, алевроліт, вапняк, кам'яне вугілля). Аналітично підтверджено факт, що діапазон частот 700 – 1400  $Hz$  гармонійних коливань є «небезпечним» з точки зору виникнення газодинамічних явищ, що встановлено експериментально в шахтних умовах.

У **четвертому розділі** виконано аналіз двох видів сейсмоакустичних досліджень. В результаті першого виду сейсмоакустичних досліджень одержане, що коливання з встановленими «небезпечними» частотами виникають в породному масиві при роботі зазвичай використовуваних в шахтних умовах машин і агрегатів. При другому виді сейсмоакустичних досліджень проведено оцінку впливу різних типів хвиль, огляд яких також наведено в цьому розділі, на характеристики реєстрованих сигналів. В результаті визначено зв'язок структури реєстрованих сигналів з кінематичними й спектральними характеристиками різних видів хвиль. Зокрема, встановлено, що на розглянутих відстанях між точкою збудження та точкою приймання коливань (найкоротша відстань  $L = 284$  м) більш високі частоти обумовлені бічними хвилями стиснення й зсуву. Оскільки параметри останніх визначаються станом контакту між вугіллям і вмісними породами, то, ймовірно, зміна параметрів спектра на цих частотах може свідчити про зміни в даній області породного масиву.

У **п'ятому розділі** розглядається можливість і порядок використання закономірностей, що були отримані при дослідженні умов старту тріщини в попередньо напружено-деформованому породному масиві (розділ 3) та спектральному аналізі експериментальних даних (розділ 4), при прогнозі газодинамічних явищ. Запропоновано використовувати новий прогностичний показник  $K_s$  в якості оцінки в породному масиві коливань «небезпечного» інтервалу частот. Проаналізовано схеми з двома прогностичними показниками

для прогнозу газодинамічних явищ з метою зменшення помилок першого і другого роду та обґрунтована умова видачі прогнозу «небезпечно». Запропоновані умови формування прогнозу газодинамічних явищ були використані при розробці апаратно-програмного шахтного сейсмоакустичного комплексу, склад і функціональні частини якого описані й проілюстровані в цьому розділі.

Щодо отриманих результатів – можна виокремити таке:

1. Вперше розроблена й досліджена математична модель старту тріщини в породному середовищі під дією квазістатичних напружень та гармонійного навантаження, що обумовлене поширенням пружних коливань в гірському масиві.

2. Вперше отримана залежність критичної довжини тріщини від величини діючого статичного напруження, амплітуди й частоти гармонійних коливань, тріщиностійкості порід та швидкості поширення хвиль Релея у даному середовищі.

3. На основі розробленої умови старту тріщини вперше встановлено, що за наявності коливальної складової існують такі режими навантаження, при яких критична довжина тріщини, що призводить до її старту, змінюється стрибком. Визначено параметри, при яких цей стрибок можливий. Для різних типів порід (дрібнозернистий пісковик, вапняк, кам'яне вугілля) встановлені діапазони частот (від 700 до 1400  $Hz$ ), в яких двократне збільшення амплітуди коливань обумовлює зменшення критичної довжини тріщини в 2 – 3 рази.

4. Вперше отримано пояснення підвищення небезпеки виникнення газодинамічного явища, яке пов'язане з процесом руйнування, при зростанні амплітуди високочастотної складової в спектрі реєстрованих коливань.

5. Запропоновано використовувати для оцінки ступеня небезпечності стану породного масиву новий прогностичний показник, який є відношенням площі ділянки спектра високочастотної складової коливань до загальної площі амплітудно-частотного спектра сигналу, що генерується в породному масиві.

6. Вперше запропоновано схему з двома прогностичними показниками для прогнозу газодинамічних явищ, що забезпечує зменшення помилок першого роду («хибне спрацювання») й другого роду («пропуск події») з урахуванням часового інтервалу перевищення даними показниками критичних значень.

Всі побажання і питання щодо наступного контенту монографії чекаємо на e-mail: [dinklimspring@gmail.com](mailto:dinklimspring@gmail.com)

*Клименко Д.В.*

## РОЗДІЛ 1 ГАЗОДИНАМІЧНІ ЯВИЩА В ШАХТАХ І МЕТОДИ ЇХ ПРОГНОЗУ

### 1.1 Газодинамічні явища: фактори, причини і наслідки їх виникнення при веденні гірничих робіт

Газодинамічні явища (ГДЯ) — це раптове руйнування масиву гірської породи, що швидко протікає і супроводжується викидом вугілля, породи і газу. Зазвичай ГДЯ супроводжуються завалами виробок вугіллям і породою, вибухами метану і вугільного пилу, руйнуванням виробок, пошкодженням машин, механізмів і обладнання. Це призводить до позапланових зупинок видобутку, проведенням відновлювальних робіт, зривів запланованих поставок продукції і, як наслідок, підвищення собівартості вугілля і зниження техніко-економічних показників.

ГДЯ найчастіше відбуваються в момент відбою вугілля і зареєстровані в стовбурах і квершлагах, штреках, ухилах, схилах, печах, збійках, лавах [Чернов О.І., 1979]. Явища, що прийнято називати «газодинамічні явища», фактично включають газодинамічні, які відбуваються в газonosних вугільних пластах і породах, і динамічні, що відбуваються в негазonosних вугільних пластах і породах. Оскільки одні й ті ж самі явища відбуваються в газonosних і негазonosних вугільних пластах і породах, то поділ назв «газодинамічні явища» та «динамічні явища» досить умовний характер.

Особливу небезпеку становить ГДЯ для персоналу, будучи причиною травм і навіть загибелі гірників.

За відомостями про викиди вугілля і газу у період 1946-1987 рр. в Донецькому басейні: відбулося 1565 раптових викидів (при відсутності вибухових робіт) і 3073 раптових викиду при вибухових роботах.

За даними Держдепартаменту промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду ДСНС (Державна служба з надзвичайних ситуацій), за перші 10

років незалежності України на її шахтах загинули понад 3400 чоловік, тобто в середньому майже щодня гинув один шахтар.

За матеріалами вільної шахтарської енциклопедії *MiningWiki* в період з 2002 по 2012 роки пішли з життя 333 шахтаря і постраждали 223 людини в результаті аварій на шахтах Донецької та Луганської областей. Нещасні випадки виникали внаслідок різних динамічних явищ: викид метану з послідувачим горінням, обвал породи, раптове провисання покрівлі, раптовий викид вугілля і газу, обвалення копру. Буропідривні роботи в загазованій шахті ведуть до аварій: на шахті імені Засядька (Донецьк) 31.07.2002 р. стався вибух метано-повітряної суміші. У вибої монтажного ходка дев'ятої східної лави в загазованій атмосфері проводилися підривні роботи за допомогою зарядів амоніту Т-19 без всякої набійки. В результаті високотемпературних продуктів детонації була підпалена метано-повітряна суміш. Загибло 20 шахтарів.

2013 року на підприємствах вугільної промисловості травмовано 3147 гірників, з них 100 - смертельно. У порівнянні з 2012 роком кількість травмованих зменшилась на 14% (503 випадків), які загинули на 17% (21 випадок). Такі дані були оприлюднені в ході Колегії Держгірпромнагляду (2013 р.), як відзначала Профспілка працівників вугільної промисловості.

У 2014-2017 рр. зазначено такі газодинамічні явища в Донецькій області.

На шахті «Північна» (Макіївка) підприємства «Макіїввугілля» 17.02.2014 р. стався вибух газоповітряної суміші в непродіряній частини зупиненої східної корінної розвантажувальної лави західної панелі пласта м3. Загибло 7 шахтарів, 11 шахтарів постраждало.

11 квітня о 5.57 2014 року у 3 східній лаві допоміжного ухилу центральної панелі пласта h1(6) шахти ім. Скочинського відбулося газодинамічне явище (викид вугілля і газу), в результаті якого загинули 7 гірників, 9 осіб отримали травми різного ступеня тяжкості. 16 грудня 2016 року під час проведення вибухових робіт в 3-й східній лаві стався раптовий викид в цій же шахті. Загиблих під час цього газодинамічного явища не було.

12 червня 2014 року 3.39 на горизонті 300 метрів шахти малого вугледобувного підприємства ТОВ «Гранд-Інвест Плюс» (м. Кіровське Донецької області) стався вибух газоповітряної суміші без послідуочого горіння. Всі дев'ять шахтарів, які перебували на той момент в гірничих виробках, загинули.

3 вересня 2014 року на шахті «Холодна Балка» ДП «Макіїввугілля» в Макіївці в конвеєрному ходку третьої північної розвантажувальної лави h10 сталося газодинамічне явище. Кількість жертв аварії склала 3 особи. На момент аварії в шахті перебували 135 працівників, 25 з яких - на аварійній ділянці. Ці дані отримані з сайту 24 каналу

[https://24tv.ua/avariyi\\_na\\_shahtah\\_zabrali\\_v\\_ukrayini\\_\\_blizko\\_tisyachi\\_girnikiv\\_statistika\\_n550571](https://24tv.ua/avariyi_na_shahtah_zabrali_v_ukrayini__blizko_tisyachi_girnikiv_statistika_n550571)

4 березня 2015 року на шахті імені Засядька в Донецьку стався потужний вибух, в результаті чого був один загиблий. Доля 32 гірників довгий час залишалася невідомою. Дані отримані з сайту 24 каналу

[https://24tv.ua/kilkist\\_zhertv\\_avariyi\\_na\\_shahti\\_zasyadka\\_zbilshilasya\\_do\\_pyati\\_\\_volinets\\_n550725](https://24tv.ua/kilkist_zhertv_avariyi_na_shahti_zasyadka_zbilshilasya_do_pyati__volinets_n550725)

8.03.2017 о 12.30 на відокремленому підрозділі «Шахта «Центральна» (м. Торецьк) в першу зміну під час виймання вугілля в уступі №2 відбулося газодинамічне явище: стався обвал вугілля з вугільного пласта, в результаті чого був смертельно травмований забійник на відбійних молотках ділянки №95-1146м.

Дані отримані з сайту

[http://www.dzerghinsk.org/news/smertelnyj\\_sluchaj\\_na\\_shakhte/2017-03-21-8793](http://www.dzerghinsk.org/news/smertelnyj_sluchaj_na_shakhte/2017-03-21-8793)

2 березня 2017 року на ш. «Степова» (с. Глухів, Сокальський район, Львівська область) відбувся вибух метану. В результаті ГДЯ загинуло 11 осіб.

Дані отримані з сайту

[http://uk.wikipedia.org/wiki/Шахта\\_«Степова»\\_\(Львіввугілля\)](http://uk.wikipedia.org/wiki/Шахта_«Степова»_(Львіввугілля))

22.01.18 року в шахті «Покровська» 12 південної «біс» лави блока 10 (м. Жданівка, Донецька обл.) відбулося ГДЯ (вибух метану). На момент аварії в шахті було 406 осіб, 8 осіб отримали опіки різного ступеня тяжкості (за інформацією телеканалу «zik»).

Згідно з даними Державної воєнізованої гірничорятувальної служби (ДВГРС) за період 1999-2018 роки на шахтах відбулися 2159 надзвичайних ситуацій, для ліквідації яких викликали ДВГРС. З них 52 раптових викидів, кількість яких за вказаний період по роках наведено на рисунку 1.1.

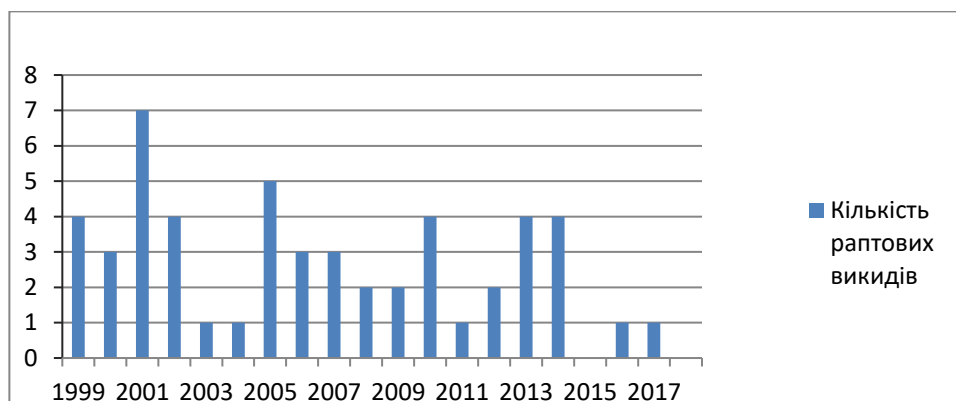


Рисунок 1.1 – Кількість раптових викидів за період 1999-2018 роки

Найбільшу небезпеку серед газодинамічних явищ мають такі явища: раптові викиди вугілля і газу, раптові викиди породи і газу, викиди газу з руйнуванням вмісних порід і викиди газу з руйнуванням підшви виробки, раптові видавлювання вугілля з підвищеним газовиділенням, раптові обвалення (висипання) вугілля з підвищеним газовиділенням, суфляри, прориви газу із зон тектонічних порушень.

Для вибору методів ефективного запобігання газодинамічним явищам вчені-дослідники пропонують класифікацію даним явищам [1].

Раптові викиди вугілля і газу ідентифікують як лавиноподібні процеси руйнування вугільного масиву гірським і газовим тиском, що швидко протікають у часі, і відкидання тонкоподрібненого вугілля газом у виробку [2]. Можливими факторами, що призводять до розвитку явища, виступають глибина ведення гірничих робіт, газоносність, знижена міцність і структурна порушеність пласта. Відбувається викид зруйнованого вугілля у виробку на відстань, що перевищує довжину його можливого розміщення під кутом природного відкосу з утворенням в кінці відкосу, на його поверхні, на кріпленні, на обладнанні тонко подрібненого

до пилоподібного стану вугілля («скажене борошно»). У момент викиду відбувається повітряний поштовх, різко піднімається концентрація метану в вибої. Газовиділення перевищує  $30 \text{ м}^3$  на  $1 \text{ т}$  викинутого вугілля. Попереджувальними ознаками такого явища є звукові ефекти (тріск і удари) у привибійній частині масиву, відскакування і луцення вугілля на поверхні вибою, підвищене газовиділення у виробки при відбиванні вугілля, затискання штанг, винос штибу газом при бурінні.

Раптові викиди породи і газу мають подібну природу з попереднім явищем, супроводжуються виносом породи в виробку потоком газу, що виділяється. Виникають в газонасичених високопористих пісковиках або при проведенні виробок буропідривним способом в зонах з геологічними порушеннями. Можливими факторами, що призводять до розвитку явища, виступають глибина ведення гірничих робіт, форма виробки, швидкість посування вибою, газоносність, фізико-механічні та структурні властивості породи. В результаті викиду спостерігається руйнування породного масиву за контуром виробки. Гірська порода подрібнюється до крупнозернистого піску. Підвищується рівень газовиділення у виробки, відчуваються повітряні поштовхи і струс масиву. Кут відкосу, під яким порода викидається в виробку, менше природного. Ознаками настання викиду породи є поділ бурового керна на опукло-увігнуті диски, збільшення ступеня подріблення породи при буропідривних роботах.

Раптові викиди газу з руйнуванням вмісних порід (покрівлі та підшви), у виробках виникають в зонах геологічних порушень або пачок тектонічно порушеного вугілля в покрівлі, що важко обрушується. Небезпека виникнення даного явища чатує при чималій площі визволення порід підшви (покрівлі) і при веденні гірничих робіт в зоні підвищеного гірського тиску. Спостерігається утворення видимих тріщин, що орієнтовані по нормалі або під деяким кутом до нашарування порід і уздовж лінії очисного забою або уздовж осі підготовчої виробки, підняття підшви, підвищене виділення газу в гірничу виробку, іноді з короткочасним перекиданням вентиляційного струменя. Основним фактором, що



ушкоджує, є газ. Прогноз явища може бути пов'язаний з підвищеним тиском на кріплення, інтенсивним здиманням підшоши.

Раптове видавлювання вугілля з підвищеним газовиділенням, що швидко відбувається, є зміщення вугільного масиву в виробку з незначним відкиданням вугілля. Між покрівлею і пластом утворюється щілина, що заповнена дрібно подрібненим вугіллям, у вугільному пласті спостерігаються порожнечі, зяючі тріщини. Можливими факторами, що призводять до розвитку явища, виступають напружений стан вуглепородного масиву, газоносність, фізико-механічні властивості пласта. Попереджувальні ознаки такі: в окремих випадках помічають підвищений тиск на привибійне кріплення, підвищене газовиділення з уже розкритих тріщин масиву, звукові ефекти (удари, тріски) в масиві, защемлення бурового інструменту.

Суфляр (фр. soufflard, от souffler – дуть) – посилене виділення газу з масиву гірських порід або вугільних пластів в пустотні простори і тріщини. Найчастіше до суфлярів прийнято відносити газовиділення, що перевищує  $1 \text{ м}^3/\text{хв}$ , на ділянці виробки менше 20 м. Виникають суфляри на газоносних вугільних пластах з широко розвиненою системою відкритих тріщин і пустотних просторів, що поширені на великій площі, мають підживлення із зони великого геологічного порушення. Такі суфляри відносять до природних. Газовиділення, що почалося, залежно від запасів газу, може тривати від кількох годин до кількох місяців. Експлуатаційні суфляри виникають у виробленому просторі, в підготовчих виробках і очисних забоях при виникненні тріщин за рахунок перерозподілу гірського тиску. Зі збільшенням глибини частота зустрічальності суфлярів зростає. У вугільних шахтах залежно від умов регламенту виділяються пласти, що небезпечні за суфлярами [3].

Прориви газу із зон тектонічних порушень - це інтенсивне короткочасне виділення газу великого об'єму (в 3 – 5 разів перевищує природну газоносність пласта) з вугільного пласта, що прилягає до зони порушень. Виникають такі прориви газу на високогазоносних пластах внаслідок дії на вибій виїмкових механізмів або при веденні буропідливних робіт. Можливими факторами, що

призводять до розвитку явища, є висока газоносність пластів (переважна дія енергії газу, що виділяється), підвищена тріщинуватість вугілля і бокових порід. Попереджувальними ознаками цього явища буде підвищене газовиділення у виробки при бурінні шпурів або під час виймання вугілля, звуки ударів в масиві під час дії на вибій механізмів, що супроводжуються повітряними поштовхами, перекиданням вентиляційного струменя. Причиною виникнення такого явища служить розкриття зони тектонічного порушення, що є колектором газу [4].

Гірський удар являє собою миттєве крихке руйнування цілика або крайової частини масиву вугілля з відкиданням або без виносу вугілля в виробку. Можливими факторами, що призводять до розвитку явища, виступають напружений стан масиву гірських порід, високі міцнісні й деформаційні властивості вугілля і бокових порід. Супроводжується гірський удар різким звуком, струсом масиву, утворенням пилу і ударної повітряної хвилі, на газоносних пластах збільшується газовиділення. У зруйнованому вугіллі переважають великі куски. Між пластом і покрівлею утворюється щілина. Попереджувальними ознаками є поштовхи в вуглепородному масиві, відскакування кусків вугілля, підвищений вихід бурового дрібняку і затискання бурового інструменту.

У даному розділі наведені лише декілька газодинамічних явищ, що відбуваються в гірничих шахтах, з докладним описом і класифікацією ГДЯ можна ознайомитися в працях [42]-[45].

З наведеного аналізу випливає, що розглянуті вище газодинамічні явища мають різну природу і механізм. Вони є результатом сукупного впливу різних чинників і організаційно-технологічних умов відпрацювання району родовища в цілому і кожного вибою окремо. Залежно від ступеня поєднання цих факторів газодинамічні явища відрізняються між собою в підготовці, розвитку та протіканні. Кожний з них в свою чергу залежить від безліч інших факторів, що можна поділити на *природні* (глибина залягання і тектонічна напруженість пластів; гірський тиск; наявність газу у вугільному масиві; фізико-механічні властивості вугілля; потужність пласта; міцність вмісних порід), що впливають на

схильність пласта (порід) до ГДЯ, *організаційно-технологічні* (порядок відпрацювання пластів; технічні та технологічні рішення щодо підготовки запасів до виймання; система розробки; власне виймання, включаючи інтенсивність виїмкового впливу на газовугільний масив), що відображають зміну напруженого стану та газодинамічного режиму пласта (порід), і *геомеханічні*, що характеризують перераховані вище зміни залежно від просторово-часових співвідношень розвитку гірничих робіт на пластах, що розробляються, і сусідніх [44], [45].

Узагальнюючи сказане вище, відзначимо, що найбільш характерною ознакою можливості ГДЯ є висока газоносність вугільного пласта, можливість припливу газу з вмісних порід особливо з викидонебезпечних пісковиків, розташованих у підшві або покрівлі пласта. Викидонебезпечність пластів визначають три фактори: напружений стан, газоносність і фізико-механічні властивості. Викидонебезпечність тим вище, чим більше величини напружень, газоносність і чим менш міцний і більш крихкий пласт [46]. Крім того, серед причин виникнення газодинамічних явищ важливе місце займає людський фактор, зменшення частки якого можливо тільки на основі контролю стану вуглепородного масиву.

Питання теорії раптових викидів як багатостадійного процесу і механізм їх формування і розвитку вивчені досить глибоко. Його формує процес утворення (розкриття) газонаповнених, паралельних забою тріщин, а реалізує - тиск вільного газу в тріщинах, яке долає опір зсуву перемички (пробки) між забоем виробки і тріщинами [46].

## **1.2 Причини й механізм газодинамічних явищ**

Для розуміння природи й механізму ГДЯ важливе значення має вивчення напружено-деформованого і газодинамічного станів привибійної частини гірського масиву, оскільки ГДЯ (конкретно, викиди) відбуваються саме в цій привибійній частині.

### **1.2.1 Напружено-деформований і газодинамічний стани гірського масиву в привибійній частині**

Автори монографії [47] описують експериментальні дослідження в шахтних умовах, протягом яких після кожного циклу виймання вугілля в лаві вимірювалися деформації і швидкість газовиділення в газовому пласту. Деформації вимірювалися тензодатчиками, що встановлювалися в свердловинах. Свердловини довжиною 6 м пробурені у вугільному пласті паралельно вибою лави. Початкова швидкість газовиділення вимірювалася в свердловинах газозатором ПГШ-1 і вимірювачем швидкості ПГ-2МА. Датчики для вимірювання деформацій, що відбуваються в масиві, і прилади для вимірювання газовиділення встановлювалися на відстані 3,8 – 5,5 м попереду від вибою виробки. На місці встановлення датчиків відзначалися деформації стиснення. На відстані 3,2–4,5 м від вибою до місця встановлення датчиків деформації стиснення збільшуються, досягаючи максимальних значень, що відповідає положенню зони максимуму опорного тиску (описувана зона розташована до 3 м попереду від вибою).

У міру наближення вибою до місця встановлення датчиків виникають деформації розширення (пружного відновлення), що свідчить про зниження напруження на даній ділянці вугільного пласта. На відстані 1,3 – 3 м від вибою до місця встановлення датчиків розширення досягають максимального значення, при подальшому наближенні вибою лави до місця встановлення датчиків деформації розширення дещо знижуються. Маємо, що у міру віддалення вибою виробки вглиб вугільного пласта напруження стиснення зростають, досягаючи максимальних значень (велику роль в цьому відіграє опорний тиск, який чиниться вугільними пластами), потім знижуються до величини напруженого стану недоторканого масиву гірських порід. Одночасно з вимірюванням деформацій відбувалися вимірювання швидкості газовиділення. У зоні зростання напруження стиснення (збільшення деформацій стиснення) швидкість газовиділення знижується. На ділянках, де відбувається спадання напружень стиснення в

вугільному пласті, швидкість газовиділення підвищується, досягаючи максимальних значень, потім у міру дегазації привибійної частини пласта знижується. В цей же час спостерігають зменшення деформацій розширення. Таким чином, можна відмітити зв'язок між процесом дегазації і зменшенням деформацій розширення. Цей зв'язок свідчить про те, що деформації розширення являють собою суму деформацій пружного відновлення і деформацій, що виникають внаслідок схильності газонасиченого вугільного пласта до «розпирання» («набухання»). Явище «розпирання» вугільного пласта проходить у міру дегазації зони, в якій вугільний пласт розташований.

Вивчався розподіл газоносності вугілля у привибійній частині вугільного пласта в результаті експериментальних досліджень в шахтних умовах. Газоносність в привибійній частині вугільного пласта визначалася з урахуванням певних правил, ці правила розробили як методику у МакНДІ в 1981 р. Газоносність вугілля у вибої виробки близька до 0, у міру віддалення від вибою газоносність зростає і на певній відстані від вибою виробки стабілізується. Автори [47] підкреслюють: попереду вибою вугільного пласта є розвантажена і дегазована зона. Величина цієї зони залежить від достатньої кількості гірничотехнічних факторів і, як показали дослідження, лежить в інтервалі [0,2 м; 2 м]. Відмічено лінійну залежність між величиною розвантажувальної зони і потужністю вугільного пласта [47]. На величину розвантажувальної зони впливають також фактор часу, стан порід покрівлі (зависання порід покрівлі перешкоджає формуванню розвантажувальної зони), глибина залягання вугільних пластів, в яких ведуться гірничі роботи, форма вибою виробки. Наявність в гірничих виробках «кутків» перешкоджає формуванню протяжної розвантажувальної зони. В околі «кутка» розмір розвантажувальної зони мінімальний. Напруження в вугільному пласті в околі «кутків» вище, ніж напруження в глибині цього ж пласта у міру віддалення від вибою «кутка». В виробках викиди відбуваються в основному у «кутках» [47].

З практики розробки викидонебезпечних вугільних пластів відомо, що при перетині лавами викидонебезпечних з геологічними порушеннями областей

викиди відбувалися найчастіше в нішах. Це можна пояснити тим, що зона розвантаження формується в таких областях повільніше і має значно менші розміри. У зонах між нішами, в областях, що описуються, викиди відбувалися в тих місцях, де фіксували зависання покрівлі. У середніх частинах лави викиди, як правило, відбуваються через зависання покрівлі. Відомі очисні виробки, що розробляються за стовповою системою, в потужних викидонебезпечних вугільних пластах, в яких викиди не спостерігалися [47]. Можна зробити висновок щодо напруженого стану вугільного масиву: гірничі виробки надають розвантажувальний і дегазований вплив на вибій пласта, тому можливі викиди вугілля і газу пов'язані з тим, що виймання вугілля здійснюють поза розвантажувальної зони в викидонебезпечній області вугільного пласта. Аналогічно проведеним експериментам в шахтних умовах і дослідженням напружено-деформованого стану викидонебезпечних і викидобезпечних пісковиків встановлено: характер розподілу напруження в привибійній зоні пісковиків такий же, як і у вугільному пласті. Таким чином, розвантажувальна і дегазована зона попереду вибою виробки пісковику існує. Шляхом буріння кернових свердловин в напрямку посування вибою виробки визначена величина зони розвантаження для пісковиків – 35 – 75 см (у викидонебезпечній зоні). З перебігом часу (до 6 діб) розвантажувальна зона може досягати 1,3 – 1,4 м, що говорить про стабілізацію напружень і газоносності у привибійній частині пісковиків.

Можна зробити висновок щодо напруженого стану для пісковиків: гірничі виробки надають розвантажувальний і дегазований вплив на вибій виробки, тому можливі викиди породи і газу пов'язані з тим, що виймання породи здійснюють поза розвантажувальної зони у викидонебезпечній області пісковиків.

Вчені сходяться на думці, що причиною ГДЯ в гірничих шахтах на 95% є технологічна діяльність людини, причому 90% ГДЯ, що відбулися, пов'язані з буропідривними роботами, 5% – з роботою видобувних механізмів [46]-[48]. Ходот В.В. саме техногенну діяльність людини пояснював як причину

стрибкоподібної зміни напружено-деформованого стану розроблюваного породного масиву, що веде до можливих ГДЯ [48].

Декілька дослідників [44]-[48] сходяться на думці щодо зон геологічної порушеності та тектонічної напруженості породних масивів як зон, що впливають на напружено-деформований стан гірського масиву. Як правило, саме в цих областях відбуваються різні ГДЯ.

Природний фактор – землетруси – сприяє активізації динамічних явищ в гірських масивах.

### **1.2.2 Енергетична теорія виникнення газодинамічних явищ**

При викиді, що провокує відторгнення привибійної частини вугільних пластів і порід, робота руйнування й переміщення відбувається внаслідок накопиченої потенційної енергії, яка міститься в масиві гірських порід. Джерелами потенційної енергії у вугільних пластах і породах є гірський тиск. Він призводить до накопичення потенційної енергії пружного деформування вугільних пластів і порід та енергії стиснутого газу, який знаходиться в різних пустотних просторах (порах, тріщинах і так далі).

Енергія, що необхідна для руйнування, є лише невеликою частиною загальних запасів енергії, що накопичена в гірському масиві. Реалізація величезних запасів енергії відбувається не завжди, а з певними умовами, тобто наявність запасів енергії є необхідною умовою виникнення ГДЯ. Вивченням достатніх умов для виникнення ГДЯ займалися Петухов І.М. та Ліньков О.М. [49]. Одним з таких достатніх умов є втрата стійкості механічного стану рівноваги. Важливо для розуміння закономірностей, що визначають нестійкість, досліджувати властивості порід, напружено-деформований стан навколо виробок, газодинамічні параметри вугільних пластів і порід даного родовища.

У результаті втрати стійкості гірські породи руйнуються. Процес руйнування відбувається у формі поширення хвилі руйнування, при цьому відбувається перетворення потенційної енергії на кінетичну енергію рухомих мас. Закінчується

цей етап зупинкою хвилі руйнування і припиненням стрімких (швидкість становить десятки м/с) переміщень мас. Із зруйнованого матеріалу при викиді продовжує виділятися газ у виробки.

ГДЯ мають загальні особливості:

- величезні запаси потенційної енергії (пружних деформацій гірських порід і стиснутого газу в їх пустотних просторах);
- перша стадія ГДЯ, що завершується втратою стійкості стану рівноваги (ініціюванням, виникненням);
- друга стадія ГДЯ, в результаті якої руйнівна хвиля поширюється від визволення поверхні вглиб матеріалу;
- третя стадія ГДЯ являє собою рух матеріалу і газу в виробку;
- четверта стадія ГДЯ: зупинка руйнівної хвилі й завершення явища.

Розподіл процесу ГДЯ на стадії запропоновано вченими [48] і відзначено, що поділ на стадії характеризує різкі послідовні зміни в умовах деформування даного елемента середовища, що піддався ГДЯ. Стадії ГДЯ можуть, взагалі, відбуватися одночасно.

Нехай  $W_g$  – енергія вільного газу, що є в вугільному пласті або породі, виділяється за рахунок розширення газу;

$W_M$  – енергія пружних деформацій вугільного пласта чи породи;

$\Delta E$  – енергія, яка виділяється з вмісних порід, в даному вугільному пласті чи породі;

$W_P$  – енергія, що витрачається на руйнування вугільного пласта або породи;

$\Delta K$  – енергія, що надає кінетичну енергію зруйнованим кускам вугільного пласта або породи;

$W_B$  – енергія, що поглинається боковими породами поблизу від місця динамічного явища;

$W_C$  – сейсмічна енергія (приблизно 10% від енергії, що виділяється), яка йде з ближньої зони в формі сейсмічних коливань;

$W_V$  – енергія, що витрачається на утворення повітряної хвилі.

Баланс енергії при динамічних явищах надається рівністю:



$$W_g + W_M + (-\Delta E) = W_P + \Delta K + W_B + W_C + W_B. \quad (1.1)$$

Ліва частина рівності (1.1) характеризує енергію, що виділяється при ГДЯ, права частина - енергію, що поглинається на стадіях протікання динамічного явища. Рівність (1.1) є законом збереження енергії стосовно до початкового і кінцевого станів системи.

Енергетичні умови, при яких можливі ГДЯ, можна записати у вигляді такої нерівності:

$$W_g + W_M > W_P + \Delta K.$$

Кількісні значення енергетичних параметрів можуть бути знайдені експериментально або розраховані за відомими формулами [47], [49].

### 1.2.3 Втрата стійкості рівноважного стану локальних зон гірського масиву

Динамічні явища пов'язані з втратою механічною системою стійкості рівноважного стану. Вивчення проблеми стійкості становить важливу частину теоретичного матеріалу, що дозволяє зрозуміти гірничотехнічний процес, отримати корисні для практики критерії небезпеки, оцінити ситуацію і розробити методи боротьби з руйнівним явищем. В якості ефектів, що сприймаються як втрата стійкості, можна розглядати необмежене наростання зміщень в масиві, струс вибою, відлущування (відрив) вугілля від вільної поверхні пласта. Кожен з відривів (якщо розглядати елементарний процес відриву) відбувається через нестійке проростання тріщин [49].

У даній роботі втрата стійкості при руйнуванні досліджується з певними підходами. Старт і розвиток тріщин у масиві є подіями, що ведуть до руйнування гірського масиву і втрати стійкості механічної системи.

Нестійкість автори [49] асоціюють з перетворенням різниці між приростом роботи зовнішніх сил і збільшенням внутрішньої енергії у кінетичну енергію  $\Delta K$ , що надає швидкість елементам середовища. Автори [49] визначають втрату стійкості системи як перевищення приросту роботи зовнішніх сил над збільшенням внутрішньої енергії  $\Delta K$  при незмінних зовнішніх умовах. Умова

стійкості для задач гірничої геомеханіки має вигляд  $\Delta K < 0$ . Відповідно стан вуглепородного масиву є нестійким, якщо  $\Delta K \geq 0$ . Дані критерії (умови) стійкості і нестійкості системи відносять до енергетичної теорії ГДЯ і застосовуються навіть до малого елемента середовища.

На думку авторів [1], [2], механізм втрати стійкості рівноважного стану гірського масиву і переходу звичайних видів крихкого пластичного руйнування до лавинного самопідтримуючого руйнування може бути представлений таким чином. В шахтних умовах під час посування гірничої виробки у привибійній зоні вугільного пласта відбувається процес зняття напруження стиснення  $\sigma_3$  по осі, що орієнтована в бік вибою. Цей процес супроводжується стрибкоподібним падінням міцності вугілля на більш низький рівень залежно від величини бокового напруження  $\sigma_3$ , що знімається. Даний момент є характерною точкою біфуркації, що визначає, яким шляхом піде далі розвиток процесу руйнування - звичайного тріщиноутворення і віджиму або лавинного самопідтримуючого руйнування, що характерне для газодинамічних явищ.

Експериментально встановлено [1], що критеріальними умовами, які визначають можливість виникнення лавинного руйнування, є наступні два.

По-перше, запас реалізованої потенційної геоенергії (пружної енергії стиснення  $W_M$  вугілля при гірських ударах і суми пружної енергії стиснення  $W_M$  і енергії газу, що виділяється,  $W_g$  при раптових викидах вугілля і газу) повинен бути вище  $0,3 - 0,5$  МДж/м<sup>3</sup>.

По-друге, характерна швидкість скидання бокового напруження не повинна бути нижче  $1 - 3$  МПа/с.

Розвиток теоретичних уявлень про причини виникнення і форми прояву газодинамічних явищ має кінцевою метою розробку методик і способів прогнозу щодо запобігання цих явищ. Зробимо короткий огляд деяких сучасних методів прогнозу газодинамічних явищ.

### 1.3 Способи прогнозу і запобігання газодинамічних явищ при веденні гірничих робіт

Нормативний прогноз ГДЯ при веденні гірничих робіт полягає у виявленні особливостей вугільних пластів або їх ділянок, у межах яких можуть відбуватися викиди вугілля, газу, породи і пилу, і в своєчасному оповіщенні про це працівників шахт. За своїм призначенням розрізняють регіональний прогноз ГДЯ (прогноз небезпеки пластів за викидами на стадії геологорозвідувальних робіт), прогноз перед розкриттям шахтопластів, локальний прогноз на діючому горизонті (визначення критичної глибини, на якій можлива поява раптового викиду) і поточний прогноз небезпечних по ГДЯ зон в лавах або підготовчих виробках. На пластах, де є загроза і небезпека за раптовими викидами вугілля і газу, найбільшого поширення набув поточний прогноз викидонебезпечності за початкової швидкості газовиділення і виходу бурового штибу [47], [49]. Початкова швидкість газовиділення непрямим чином характеризує тиск газу в пласті та його газоносність, а вихід бурового штибу – гірський тиск і міцність вугілля.

Поточний прогноз викидонебезпечності за початкової швидкості газовиділення і виходу бурового штибу застосовується на вугільних шахтах понад 35 років, однак його не можна вважати надійним, тим більш перспективним, оскільки йому притаманні такі недоліки.

Початкова швидкість газовиділення, що в даному прогнозі використовується як основний показник викидонебезпечності, не завжди правильно і однозначно відображає цю викидонебезпечність, оскільки одночасно і неоднозначно пов'язана і з газоносністю і з газопроникністю привибійної частини пласта. Звідси в разі високої газопроникності можна отримати критичні (викидонебезпечні) значення початкової швидкості газовиділення на низькогазоносному (безпечному) пласті або ділянці (помилка першого роду). І, навпаки, в разі низької газопроникності можна отримати безпечні значення початкової швидкості газовиділення на високогазоносному (небезпечному) пласті або ділянці (помилка другого роду).

Поняття «помилка першого роду» і «помилка другого роду» використовуються в такому значенні. Надана вибірка  $X$  значень деякого прогностичного показника, за результатами яких видається результат «небезпечно» або «безпечно». Висуваємо нульову гіпотезу  $H_0 = \{\text{газодинамічне явище не відбудеться}\}$  і альтернативну гіпотезу  $H_1 = \{\text{газодинамічне явище відбудеться}\}$ . Має бути прийнято бінарне рішення про вірність гіпотез  $H_0$  або  $H_1$ . Прийняття рішення про вірність гіпотези  $H_0$  відповідає отриманню результату «безпечно», прийняття ж рішення про вірність гіпотези  $H_1$  - відповідно отримання результату «небезпечно».

Якщо прийнято рішення «небезпечно», але за фактом газодинамічне явище не відбулося, то маємо помилку першого роду (хибне спрацювання). Помилка першого роду полягає в тому, що відкинута правильна гіпотеза. Якщо прийнято рішення «безпечно», але за фактом газодинамічне явище відбулося, то маємо помилку другого роду (пропуск події). Помилка другого роду полягає в тому, що прийнята неправильна гіпотеза.

У практиці застосування поточного прогнозу викиднебезпечності за початкової швидкості газовиділення і виходу бурового штибу таких помилок зустрічається досить багато. Якщо помилки першого роду, невиправдано завищуючи протяжність небезпечних за прогнозом зон, негативно позначаються на техніко-економічних показниках роботи шахт, то помилки другого роду часто призводять до фінансових збитків, зупинці виробництва, а також, на жаль, до людських жертв.

Прогноз за початковою швидкістю газовиділення і виходу бурового штибу застосовується в зупинених (нерухомих) вибоях, тоді як раптові викиди вугілля і газу відбуваються, зазвичай, в процесі видобутку вугілля і проведення виробок, тобто активна складова від дії на пласт цим прогнозом не враховується.

І, нарешті, прогноз по початковій швидкості газовиділення і виходу бурового штибу в існуючому вигляді не піддається автоматизації - висновок про безпеку зони пласта може залежати від оператора (гірничого майстра за прогнозом), тобто від суб'єкта, показання якого важко, а іноді й неможливо перевірити.

Прогноз гірських ударів, як один з видів газодинамічних явищ, базується на виявленні перенапружених ділянок вугільного пласта, схильних до крихкого руйнування, що швидко протікає. Прогноз ударнебезпеки вугільних пластів і ділянок здійснюється за:

- реєстрацією процесів і явищ, що супроводжують буріння контрольних шпурів;
- зміною електропровідності вугілля;
- зміною вологості вугілля;
- зусиллям вдавлювання штампа в вибій або стінки шпуру.

Все більшого розповсюдження (особливо на пластах, одночасно небезпечних за раптовими викидами і гірничих ударів) отримує прогноз за параметрами фазово-фізичного стану (ФФС) пластів [5].

Суть методу полягає в такому: вугільний пласт розглядається як трифазна система (тверда частина - волога - газ). У цій системі виділяють по відношенню до рідкої фази три характерних показника ФФС: максимальна гігроскопічна вологість  $W_{M.G.}$ , характеризує сорбційний поровий об'єм вугілля; показник структури порового простору  $G_{M.G.}$ , відповідає пайовій участі в загальній пористості сорбційного порового об'єму; природна вологість  $W_e$  або показник природного водонасичення  $G_e$ . Визначення цих 3 показників фазово-фізичного стану відбувається в лабораторних умовах. Використовують зразки вугілля, що відбирають у шахтах. Критеріями віднесення пластів вугілля марок Ж, К, ОС і П до ударо- чи викидонебезпечних слугують такі співвідношення.

При  $W_e \leq W_{M.G.}$  або  $G_e \geq G_{M.G.}$  пласти вважаються схильними до гірських ударів.

У небезпечних зонах таких пластів  $G_{M.G.} \rightarrow 0,7$ ,  $W_e \leq G_{M.G.}$  і  $W_{M.G.} \leq 3\%$ .

При  $G_e \leq 0,5$  і  $W_e \leq W_{M.G.}$  пласти вважаються схильними до раптових викидів. У небезпечних зонах таких пластів  $W_{M.G.} = 1,5\% - 3,0\%$ ,  $G_{M.G.} \leq 0,35$  і  $G_e \leq 0,25$ .

Основними недоліками даного методу прогнозу газодинамічних явищ є його трудомісткість і дискретність вимірюваних показників, що не задовольняє

вимогам, що пред'являються до методів поточного прогнозу газодинамічних явищ.

Перераховані вище методи прогнозу раптових викидів вугілля і газу та гірських ударів є нормативними і широко застосовуються в шахтах. Крім того, існують інші методи прогнозу газодинамічних явищ, що знаходяться в стадії розробки або ж застосовуються фрагментарно, в основному для наукових цілей [Хейфец О.Г., Ходжаєв Р.Р., 1992]. Зокрема, відомі роботи вчених-дослідників (Скакун О.П., Максимов О.С.) по створенню електрометричного методу і апаратури для оцінки ступеня ударонебезпеки ділянок гірничих виробок (методика експрес-оцінки ударонебезпечності ділянок вугільних пластів на основі електрометрії з апаратурою СЕР-1). Основою методу є залежність питомого електричного опору від тиску. У складних гірничо-геологічних умовах графік зондування заносять в пам'ять, а оцінку і порівняння виконують по відхиленню таблиці зондування на різних ділянках від базового графіка. Однак такий метод не отримав широкого застосування.

Описані вище методи прогнозу більшим ступенем базуються на ідентифікації властивостей вугільного пласта та існування сукупності факторів, що сприяють його викидонебезпечності. Для кожного басейну і родовища застосовується той метод прогнозу, який найбільш повно відповідає місцевим гірничотехнічним умовам.

З точки зору прогнозу поведінки вуглепородного масиву, як динамічної системи і можливої втрати рівноваги цієї системи, найбільш перспективними методами прогнозу газодинамічних явищ є реєстрація і аналіз акустичних коливань, що поширюються в породному середовищі.

#### **1.4 Акустичний контроль стану вугільних пластів**

Існуюче різноманіття акустичних методів контролю можна поділити на два класи, що називаються «активними» і «пасивними» [52].

Широке розповсюдження в колишньому СРСР і за кордоном отримав пасивний метод контролю стану гірського масиву. Цей метод базується на реєстрації пружних імпульсів, що супроводжують порушення суцільності вугільного пласта і гірських порід. Акустичні імпульси в твердому тілі генеруються порушеннями його цілісності, такими як дислокації та тріщини. Питанням генерації пружних імпульсів при розвитку тріщин присвячена велика кількість наукових робіт [42], [48], [53]. Передбачається, що центрами акустичної активності гірських порід є самі тріщини. Джерелом енергії для розвитку тріщини, що розриває внутрішні зв'язки в структурі твердого тіла, є енергія напружено-деформованого середовища навколо тріщини. Тріщина, будучи концентратором напружень, при перевищенні напруження певної величини зростає, реалізуючи надлишок пружної енергії в вугільному пласті. При цьому різка зміна напружень, що оточують тріщину, породжує імпульс, що впливає, в свою чергу, на інші тріщини. При навантаженнях, що призводять до крихкого руйнування матеріалу, пружні хвилі можуть призупиняти або, навпаки, прискорювати процес зростання тріщини, а також сприяти появі нових тріщин [48].

Перші спроби реєстрації природних сейсмоакустических імпульсів для контролю стану гірського масиву відносяться до 30-х років двадцятого століття. Однак відсутність необхідної апаратури і задовільної методики не дозволили застосувати метод аж до 60-х років. Подальші успішні апаратурні і методичні розробки сприяли впровадженню сейсмоакустического методу на багатьох шахтах Донбасу [52], [54]. Однією з модифікацій цього методу прогнозу викидонебезпечності на шахтах Донбасу є сейсмоакустичний метод, який запропонував М.С. Анциферов ще в 1960 р. [52].

Природним розвитком підходу з'явилися розробка і впровадження методу сейсмоакустичного контролю з метою ефективності запобігання викидів в очисних виробках.

Однак область застосування цього методу контролю обмежена в умовах невідповідності сейсмоакустичній активності й шумності вугільного пласта.

Вугільні пласти і вмісні породи характеризуються різним ступенем сейсмоакустичної активності. Межі цієї величини, що виражається шумністю - кількістю імпульсів акустичної емісії в одиницю часу, коливаються від 1000 і більше імпульсів на годину (пласт «Безіменний-захід» на шахті «Юнком» в 1964 – 1965 рр.) до 0 – 2 імп/год (понад 75% пластів у 2018 р. в Донбасі). Причому реальна ступінь небезпеки пласта не пов'язана прямо з рівнем сейсмоактивності. Так, на згаданому пласті «Безіменний-захід» не було жодного викиду, а на пласті Гріцинка (шахта «Комсомолець» в Центральному Донбасі), наприклад, при рівні шумності 0 – 5 імп/год у 1968 – 1969 рр. зареєстровано кілька раптових викидів вугілля і газу [3].

Значна відмінність в рівні сейсмоакустичної активності знижує ймовірність прогнозу, оскільки для всіх умов прийняті єдині критерії небезпеки: 4 – 5-кратне перевищення одиничного значення годинної шумності над величиною, що усереднює 30 значень при роботі видобувного або бурового механізму, по-перше, чи дворазове поспіль збільшення цієї середньої, по-друге.

В очисних виробках пологих пластів спостерігаються випадки, коли інтенсивність утворення тріщин суттєво зростає після раптового викиду вугілля і газу. Так, на пласті «Смолянинівський» (19 західна лава) шахти ім. Петровського в липні, серпні, вересні та першій половині жовтня 1977 року рівень шумності був в межах 1 – 2 імп/год. 17 жовтня в нижній ніші комбайнової лави стався раптовий викид вугілля і газу. З 18 жовтня і до другої половини листопада шумність зростає до значень 10 – 22 імп/год [3].

Протягом березня-початок квітня 1974 року шумність пласта «Прасковієвський» (лава 12) на шахті ім. Газети «Соц. Донбас» не перевищувала значень 20 – 35 імп/год. Після раптового викиду 12 квітня в струговій лаві рівень шумності зріс до 400 і вище імп/год, причому максимальні значення шумності протягом декількох днів після викиду зареєстровані за відсутності виймання вугілля. Цей факт пов'язаний з відносно малою шумністю пласта, що свідчила про недостатність його розвантаження та поступове накопичення пружної енергії. Після раптового викиду, який ініціював додатковий розвиток тріщин в пласті,



його висока шумність свідчила про безперервне розвантаження і відсунення максимуму опорного тиску вглиб масиву [3].

Аналіз показує, що на достовірність прогнозу впливає відсутність частотно-енергетичного аналізу реєстрованих імпульсів. Це сприяє зведенню в одну статистичну сукупність імпульсів, що характеризуються різною довжиною, тривалістю інтенсивності і мають місце як у вугільному пласті, так і у вмісних породах. Крім того, неоднозначність сейсмоакустичної інформації, що прийнята до статистичного аналізу, призводить до того, що загальне підвищення шумності може бути наслідком збільшення інтенсивності мікроруїнування в гірському масиві, яке не призводить до втрати його стійкості, а свідчить про інтенсивне розвантаження в гірському масиві.

В УкрНДМІ апробовано методикау шахтної сейсмозрозвідки для виділення небезпечних зон з гірничих виробок [55].

Використаний метод відбитих хвиль. Спостереження проводилися за схемою сейсмозондування. Сейсмоприймачі встановлювалися посередині пласта. Коливання збуджувалися у вибої штреку з двох сторін виробки поблизу вибою на віддаленні 5 – 10 м та від 20 – 50 м від вибою з кроком 10 м.

Сейсмоприймачі в кожному пункті орієнтувалися в площині пласта уздовж осі виробки (вісь X) і в перпендикулярному напрямку (вісь Y). Збудження коливань проводилися в покрівлі та підшві пласта ударним способом з накопиченням в кожному випадку 30 – 40 ударів. Реєстрація пружних хвиль здійснювалася за допомогою 12-канальної сеймостанції ШЗР-1 «Дружба». Обробка матеріалів спостережень проводилася за допомогою пакета прикладних програм «Крот». Даний метод був випробуваний як експеримент і ширше не використовувався.

Для оцінки ударнебезпеки ділянок вугільних пластів використовується принцип реєстрації подій сейсмоакустичної емісії (САЕ) по перевищенню амплітуд сигналів заданого амплітудного порога реєстратора протягом деякого інтервалу часу [56]. При фіксації події виробляється стандартний сигнал, що надходить на лічильник імпульсів САЕ. Отримане значення активності

порівнюють з критичними рівнями, що встановлені експериментально для конкретного родовища.

Для аналізу структури імпульсів САЕ за енергіями використовують принцип оцінки пікової амплітуди і порівняння її з декількома порогами, що перевищують заданий. При оцінці приймається: чим більше активність САЕ на заданому порозі і більше частка високоамплітудних імпульсів, тим вище напруга і інтенсивніше реакція масиву у вигляді утворення тріщин, і тим вище ступінь ударонебезпеки [55].

Для ділянок з низькою інтенсивністю природного САЕ розроблена методика оцінки ступеня ударонебезпеки, яка базується на реєстрації САЕ при ударно-обертальному бурінні свердловин перфоратором. Методика ґрунтується на виникненні САЕ при впровадженні бурового інструменту в гранично напружені породи. Її реєстрація ведеться при постійному порозі з накопиченням даних за інтервалами свердловини. При цьому виділяють інтервал з максимальною активністю і відстань від нього до контуру виробки, яке вважають рівним відстані до максимуму опорного тиску  $X$ . Як показники ступеня ударонебезпеки використовують:

1) відносну активність в максимумі  $\frac{N_{\max}}{N_0}$ , де  $N_0$  - активність в розвантаженому масиві у контуру,

2) відносна відстань до максимуму  $\frac{X}{h}$ , де  $h$  - характерний розмір виробки.

Чим вище перший показник  $\frac{N_{\max}}{N_0}$  і менше другий показник  $\frac{X}{h}$ , тим вище ударонебезпека.

Однак недоліком вищевикладених методів є відсутність регіональних залежностей інформативних параметрів АЕ на стадії підготовки викидонебезпечної ситуації і визначення їх критеріальних значень.

На кафедрі будівництва і геомеханіки Державного ВНЗ «НГУ» м. Дніпро з 80 років минулого століття розвивається спосіб прогнозу ГДЯ, в основу якого

покладено принципово новий підхід активного зондування досліджуваної області штучним акустичним сигналом, що згенерований у вугільний пласт добувними або прохідницькими механізмами [6], [7]. Вчені Мірер С.В. і Масленніков Є.В. [50] запропонували критерій акустичного контролю стану досліджуваної області масиву і його апаратне забезпечення типу АК-1 на підставі обробки експериментальних даних [6]. Предметом досліджень були акустичні коливання, що поширювалися в привибійній області породного масиву. Аналізуючи акустичний сигнал, був запропонований прогностичний показник викиднебезпечності вугільних пластів по амплітудно-частотних характеристиках  $K_B$  [57]-[59]. Безрозмірний коефіцієнт  $K_B$  є відношення амплітуди високочастотної складової спектра акустичного сигналу  $A_B$  до амплітуди низькочастотної складової спектра  $A_H$ :

$$K_B = \frac{A_B}{A_H}. \quad (1.2)$$

Розподіл акустичного сигналу на високочастотні і низькочастотні складові здійснюється спектроаналізатором апаратури АК-1 за допомогою змінних фільтрів високої частоти (600, 800, 1000 Hz) і низької частоти (160, 200, 300 Hz). На стадії розвідувальних спостережень підбирають пару високочастотних і низькочастотних фільтрів, при яких в невикиднебезпечній зоні значення показника  $K_B$  не перевищує 1 ( $K_B \leq 1$ ). Величина показника  $K_B$  визначається автоматично і контролюється оператором служби прогнозу по стрілковому індикатору [8].

Якщо в процесі ведення прогнозу на стрілковому індикаторі реєструється значення прогностичного показника  $K_B \geq 3$  впродовж часу  $\Delta t$  (значення визначається індивідуально для кожної підготовчої виробки і для кожного каналу реєстрації в очисному вибої), то автоматично включається сигналізатор звукового оповіщення, і оператор видає прогноз «небезпечно». Далі оператор передає повідомлення про це диспетчеру, робить відповідний запис у журналі попереджень. Апаратура типа АК-1 встановлюється на поверхні в приміщенні

служби прогнозу і підключається до лінії зв'язку з підземним блоком звукоуловлювальної апаратури (ЗУА), що використовується для прогнозу за акустичною емісією.

Структура і детальна робота апаратури типу АК-1 описані в статті [57]-[59] і нормативно введена Стандартом Мінвуглепрому України (с. 34) в 2005 року [8].

Як відзначають автори [57]-[59], відношення (1.2) має фізичний сенс тим більше, що викидонебезпечна ситуація відрізняється від безпечної не тільки зростанням амплітуди супергармонік (високочастотних коливань), а й зменшенням або ж відсутністю субгармонік (низькочастотних коливань). До теперішнього часу зміни значень показника  $K_B$  в сторону критичних (і вище) запропонованого критерію викидонебезпечності пояснювалася таким чином: зі збільшенням гірського тиску розміри макропор, мікро- і макротріщин зменшуються, дисипація енергії високочастотних коливань зменшується [57]-[59]. Тоді підвищення напружень в деякій області пласта має призвести до зростання амплітуди вимушених коливань на основній частоті та на частотах супергармонік (високочастотні коливання) більш істотного, ніж амплітуд субгармонійних (низькочастотних) коливань.

Дана аргументація критерію викидонебезпечності не пояснює виникнення динамічних явищ, так як зменшення розмірів порушень суцільності (пор, тріщин і ін.) не веде до розвитку ГДЯ. Не описаний процес деформування і руйнування масиву гірських порід при досягненні критичного значення коефіцієнтом  $K_B$ , оскільки не представлений зв'язок збільшення амплітуди вимушених коливань на основній частоті та на високих частотах з початком газодинамічних явищ.

Пізніше коефіцієнт  $K_B$  був використаний як один з прогностичних параметрів акустичного сигналу в способі автоматизованого контролю викидонебезпечності в очисних виробках за параметрами техногенного акустичного сигналу фахівцями МакНДІ [9]. На основі аналізу параметрів акустичного сигналу була розроблена апаратура АПСС (апаратура передачі сейсмоакустичного сигналу) [8].

Наукові дослідження з використання сейсмоакустичного методу в гірничій справі розвиваються в багатьох країнах, зокрема, на території України [10], Південної Африки [11], [12], Австралії [11], Польщі та Боснії і Герцеговини (наприклад, використання іскробезпечної сейсмічної системи ARAMIS M/F для моніторингу сейсмічної небезпеки) [13], [14], Китаю [15], [16], США [17], [18], Ірландії [19].

Спектральний аналіз акустичних сигналів дає найбільш повне уявлення про напружено-деформований стан породного масиву. Такий спосіб є найбільш технологічним і автоматизованим. Проте йому притаманні помилки першого роду.

Так, при випробуваннях апаратури типу АК-1 (період 15.02.89-1.07.90 рр.) в вибої 4-го західного відкатного штреку (вугільний пласт h8 «Прасковієвський» шахти ім. 60-річчя Радянської України ВО «Донецьквугілля») помилки першого роду склали 44%.

При випробуваннях методу акустичного контролю в 5-му західному відкаточному штреку цього ж викидонебезпечного пласта помилки першого роду склали 28%.

За період 1986–1990 рр. при випробуваннях прогнозу викидонебезпечності вугільних пластів в умовах шахтоуправління «Донбас» було отримано за амплітудно-частотними характеристиками (АЧХ) акустичного сигналу понад 400 результатів «небезпечно», в яких відбулося понад 50 раптових викидів вугілля і газу [50].

Незважаючи на значну ймовірність помилки першого роду, даний прогноз викидонебезпечності за АЧХ акустичного сигналу застосовується щодо прогнозу викидонебезпечності вугільних пластів і є нормативним [8, с. 34].

Прогноз викидонебезпечності вугільних пластів за параметрами акустичного сигналу також є нормативним [8]. Він полягає в реєстрації, обробці отриманого сигналу і аналізі його спектра. Прогностичними параметрами спектра сигналу є: частота максимальної амплітуди спектра (резонансна частота), нижня і верхня частоти при середньому рівні амплітуд, амплітуди низько- і високочастотних

складових спектра, коефіцієнт викидонебезпечності  $K_B$ . За значеннями вказаних параметрів видається висновок про викидонебезпечність вибою. Прогноз застосовується для очисних і підготовчих вибоїв [8].

Автори [60] вважали, що підвищення точності прогнозу викидонебезпеки вуглепородного масиву для зменшення помилок першого роду можна досягти шляхом більш глибокого і теоретично обґрунтованого амплітудно-частотного аналізу акустичних коливань, що згенеровані добувними механізмами. Однак саме теоретичне обґрунтування виділення параметрів зі структури акустичного сигналу, методик визначення прогностичних показників і їх оптимальної кількості за деяким прогнозом на даний момент відсутній.

У роботі Короля В.І. [51] запропоновано поряд з коефіцієнтом викидонебезпечності  $K_B$  два нових прогностичних показника  $K_2$  і  $K_3$ .

Показник  $K_2$  вводиться як відношення площі спектра  $S_t$  акустичного сигналу в поточний момент часу до площі спектра сигналу в попередній момент часу  $S_{t-1}$ :

$$K_2 = \frac{S_t}{S_{t-1}}.$$

Показник  $K_3$  визначається як відношення модуля різниці площ спектра акустичного сигналу в поточний і наступний моменти часу до кількості відліків  $\Delta t$  в спектрі сигналу:

$$K_3 = \frac{|S_t - S_{t-1}|}{2000 \cdot \Delta t}.$$

Недоліком показника  $K_3$  є залежність від розмірностей величин, що визначають його.

Введення додаткових критеріїв підвищить достовірність прогнозу [51]. На доказ чого наводиться імовірнісна оцінка прогнозу ГДЯ при введенні в схему прогнозу декількох прогностичних ознак. Однак такий висновок вірний тільки в тому випадку, коли критерії прогнозу є незалежними (за умови незалежності

вказаних показників та отриманих по ним результатах в момент прийняття рішення «небезпечно»).

Якщо критерії прогнозу незалежні, то ймовірність правильного прогнозу підвищується в основному за рахунок зменшення помилок другого роду, оскільки результати (що незалежно визначаються) «небезпечно» або «безпечно» критеріїв прогнозу підтверджують («страхують») один одного. Однак при цьому значно зростає ймовірність помилок першого роду. Якщо показники залежні, то апаратура видаватиме однаковий результат. Причому, чим більше залежних показників буде включено до певного критерію, тим більше буде й помилка першого роду.

Аналогічно поглядам Мірера та Масленнікова [57], [58], Король В.І. у [51] відзначає залежність змін амплітуди вимушених коливань (сигналів) на основній частоті та на частотах супергармонік (високочастотні коливання) від змін напружено-деформованого стану гірського масиву. Представлені фрагменти п'ятихвилинного запису реєстраційної інформації (апаратури АК-1м) з результатами статистичної обробки [51]. Однак, незважаючи на наведений досвід застосування апаратури АК-1м на шахтах, не обґрунтовано критерії прогнозу газодинамічних явищ, що включають прогностичні показники  $K_2$  і  $K_3$ . Не розглядався зв'язок різних значень показників  $K_2$  і  $K_3$  зі змінною оцінкою характеристик реєстрованих коливань в масиві, а також з можливістю розвитку процесів руйнування.

Таким чином, потрібно чітко формулювання критеріїв прогнозу ГДЯ, що включаються у певній схемі прогнозу.

Для цього необхідні глибоке теоретичне обґрунтування зв'язку характеристик акустичного сигналу зі станом вуглепородного масиву, точне формулювання незалежних прогностичних критеріїв, кількісні оцінки процесів, що відбуваються при виникненні пружних імпульсів в породному середовищі.

Аналіз сучасних досліджень за виникненням газодинамічних явищ, за методами й способами їх прогнозу, за властивостями і станом масиву гірських порід показує, що найбільш ефективним для вугільних шахт є прогноз викидів

вугілля, породи і газу по амплітудно-частотних характеристиках акустичного сигналу. Однак в даний час надійність прогнозу «небезпечно» в гірничо-геологічних умовах за допомогою існуючих методів складає приблизно 30% [71]. Недолік використовуваних методів прогнозу обумовлений використанням слабо обґрунтованих критеріїв прогнозу, що базуються майже виключно на узагальненні експериментальних спостережень. Також багато критеріїв не розглядають зв'язок між характеристиками реєстрованих коливань в масиві і можливістю розвитку процесів руйнування гірської породи.



## РОЗДІЛ 2 ДИНАМІКА ГІРСЬКОГО МАСИВУ Й ПРОГНОЗУВАННЯ ЙОГО СТАНУ

Відповідно до сучасного стану вивченості даної теми поведінка масиву порід в цілому визначається, перш за все, дефектами в його структурі, тому прийнято розрізняти скельну монолітну породу і скельний масив порід – блоки (сукупність) скельної породи, що пронизані тріщинами та іншими порушеннями [20].

Метою геомеханіки є вивчення процесів деформування і руйнування геологічного середовища на базі механіки деформованого твердого тіла. Найбільш розробленим засобом механіки деформованого твердого тіла, що знайшов поширення при вирішенні задач гірського тиску, є метод кінцевих елементів [Фадєєв, 1987; Зенкевич, 1975; Черников, 1994].

Згідно [20], [21], облік окремих порушень принципово можливий як облік структурних елементів неоднорідності [Витке, 1990] або за допомогою спеціальних контактних елементів [Cundall, 1990]. Для блокових масивів розроблено метод граничних елементів, що дозволяє описувати різні умови на границях блоків [Зубков, 1999]. Частина масиву з плоскими дефектами описуються як суцільне середовище з анізотропними властивостями міцності й деформацій [Витке, 1990].

Моделювання процесів в тріщинуватих і шаруватих середовищах являє собою складну, не вирішену до кінця проблему. Труднощі опису процесів деформування і руйнування при моделюванні тріщинуватого масиву гірських порід полягає в необхідності формулювання початкового стану порушеності і обліку зміни параметрів анізотропних властивостей деформацій та міцності при деформації й розвитку дефектів. Це пов'язано з тим, що в більшості випадків напрямок і кількість залучених до процесу руйнування систем послаблень (тріщин, контактів шарів, прошарків слабо міцних і пластичних порід) в окремих частинах досліджуваної області не є відомим.

По-перше, найважливішою особливістю масивів гірських порід є його початковий напружено-деформований стан. По-друге, постійно діючим фактором,

що визначає напруження в масиві, є сили ваги. По-третє, на формування загальних закономірностей напруженого стану у верхній частині земної кори впливає тектоніка плит. Оцінку полів діючих напружень можна отримати тільки із залученням математичного моделювання.

## 2.1 Уявлення про природний напружений стан гірського масиву

Напружений стан недоторканого масиву гірських порід являє собою важливу інформацію для проектування і розрахунку елементів систем розробки родовищ корисних копалин.

Вчені дотримуються думки, що напруження в вугільних пластах або масивах порід підкоряються закономірностям, що визначаються гіпотезою про гравітаційне поле напружень. Такі погляди у відомих геомеханіків: Г. Еверлінг, О. Якобі, Р. Феннер, М. Протод'яконов, О. Динник, Л.Шевяков, П. Цимбаревич, В. Слесарєв, К. Руппенейт, В. Давідянець. До теперішнього часу вчені дотримуються гіпотези (на думку О.М. Динника) про те, що гравітаційні напруження в недоторканому масиві відповідають умовам пружної поведінки коефіцієнта бічного розпору  $\lambda_0$ . Даний коефіцієнт  $\lambda_0$  визначає відношення бічних (в горизонтальній площині) напружень до вертикальних напружень

$$\lambda_0 = \frac{\nu}{1-\nu}, \text{ де } \nu \text{ — коефіцієнт Пуассона.}$$

Хоча таке уявлення широко поширене, фахівці відносяться до нього з сумнівом, оскільки ця гіпотеза вірна лише в товщі гірських порід, що розглядається як пружне, суцільне та ізотропне середовище [Барях, 1996].

Існує гіпотеза про гідростатичний напружений стан гірського масиву, так звана гіпотеза А. Гейма. Це перша наукова гіпотеза про сили, що діють в недоторканому скельному масиві порід, обґрунтована у 1878 року. Тиск порід, за Геймом, є не що інше, як тяжкість товщі порід. Тиск в недоторканих масивах діє в усіх напрямках гідростатично й по абсолютній величині. Гіпотеза швейцарського вченого А. Гейма про напруження в непорушеному скельному масиві протягом

минулого століття була спростована, але знаходить відображення в працях відомих в області механіки гірських порід фахівців – С.Г. Авершина, М. Талобра, Л. Мюллера та інших [22].

Цимбаревич у 1948 році висловлює ідею двох складових напружень: гравітаційної і тектонічної, що діють в гірському масиві. Вперше теоретично обґрунтував можливість існування тектонічних сил в земній корі академік М.В. Гзовский (1954).

Напружений стан масиву порід формується під дією сил ваги, руху літосферних плит, сил гідростатичного зважування та інших природних впливів [20]. Тектонічні напруження беруть участь у формуванні напружень, переважно, в горизонтальній площині, в гірському масиві. Вертикальна складова напружень, в середньому, відповідає вазі товщі порід, що налягає. Уявлення про роль сил ваги, що існували раніше, в формуванні напружень не суперечать відомим даним. Вплив тектонічних сил додає запитань в завдання розрахунку напружень в масиві порід, інформація про які важлива при проектуванні гірничих виробок [20].

Гірський масив до проведення в ньому виробок знаходиться в стані рівноваги (якщо не враховувати вплив природних землетрусів): гравітаційні і тектонічні напруження врівноважуються один одним і опором гірських порід (міцністю) на всебічний стиск.

## **2.2 Деформування та руйнування гірських порід з плином часу й в околі виробок**

Гірські породи відносять найчастіше до крихких матеріалів, руйнування яких відбувається з утворенням нових і розвитком вже існуючих тріщин. З плином часу в масиві гірських порід можуть виникати умови, що призводять до орієнтованого ослаблення порід, зокрема, до появи тріщин. Під дією напружень елемент масиву може руйнуватися (втрачати частину початкової міцності) за деякими поверхнями в результаті зсуву при стисненні або розтягуванні.

При проходці гірничих виробок в масиві порід існуючий напружений стан змінюється, що призводить до деформації порід (можливо до їх руйнування), на характер якого впливають існуючі дефекти, при цьому деформуються і руйнуються елементи гірничих виробок. Для прийняття надійних і економічних заходів захисту гірничих виробок необхідно знати, яким чином природні орієнтовані ослаблення впливають на процеси руйнування навколишніх порід. Умови можливого руйнування пластів або порід залежать від форми і розмірів виробки. Втрата міцності елементів виробок залежить від співвідношення розмірів вільних поверхонь в забої і елементів неоднорідностей в будові масиву порід.

Автор [23] відмічає, що в процесі порушення рівноважного стану гірського масиву виникає гірський тиск, що може призвести до деформацій масиву й руйнувань вугілля або порід у виробці. Величина гірського тиску, перш за все, залежить від напруженого стану недоторканого масиву, від тріщинуватості гірської породи, стійкості вмісних порід, від форми виробки та технологічних факторів.

Згідно роботі [23] стійкість гірничої виробки має вигляд:

$$k_{\sigma} \cdot k_z \cdot \sigma_1 < \sigma_{сж},$$

де  $k_{\sigma}$  – коефіцієнт інтенсивності напружень в масиві, може приймати значення з інтервалу [2;7],  $k_z$  – коефіцієнт запасу,  $\sigma_1$  – вертикальне напруження в масиві,  $\sigma_{сж}$  – міцність на стиск пластів або порід у масиві, *МПа*.

Поблизу гірничих виробок напруження недоторканого масиву перетворюються в опорний тиск внаслідок перерозподілу навантажень над виробкою. У порівнянні з тиском недоторканого масиву гірський тиск в околі виробки збільшується з урахуванням концентрації опорного тиску.

Відповідно до сучасних уявлень механізм деформування, зрушення, обвалення порід має такий вигляд. У процесі ведення робіт у виробках порушується природна рівновага зовнішніх навантажень і внутрішнього опору порід. Породний масив немонолітний і його поверхня ослаблена тріщинами

певної довжини, що мають різноманітні наповнювачі (газ, вода, пил та ін.). Пустотні простори масиву (тріщини, порожнини і т.д.) викликають пружні деформації (зсуви), а при деяких умовах і руйнування в масиві. На даний процес впливає різноманітна кількість факторів, тому єдина математична модель, що описує таку динаміку масиву, відсутня. До того ж породний масив, що розбитий тріщинами на структурні блоки, на різних ділянках поводить себе як пружне середовище, то як пластичне середовище, то як сипуче середовище залежно від характеру та інтенсивності порушеності масиву. Внаслідок чого деформування гірського масиву на таких ділянках різняться. Чим нижче тріщинуватість масиву, тим вище потенційна енергія пружного деформування масиву; чим вище тріщинуватість масиву, тим нижче тектонічні напруження масиву, оскільки накопичена енергія вже частково реалізувалася в старт або подальше розкриття тріщин, а також в зсуві структурних блоків відносно один одного [23].

### 2.3 Умови розвитку тріщин

Добре відомо, що теоретична міцність твердого тіла, яка розрахована для деякої моделі, в сотні або тисячі разів перевищує реальну міцність схожого природного зразка [24]. Пояснення цьому факту запропонував Гриффітс [25]: будь-яке реальне тіло містить тріщини, що під дією навантаження можуть збільшуватися в розмірах, або ж випадковим чином залишатися такими ж.

1) Енергетична умова розвитку тріщини. Можливість старту тріщини визначає сума енергій:  $U$  - енергія поля прикладеного зовнішнього навантаження  $F$ ,  $W_M$  - енергія пружних деформацій тіла (рис. 2.1). Протидіють розвитку тріщини енергія пластичної деформації  $P$ , що накопичується в області у вершині тріщини, і поверхнева енергія тріщини  $\gamma$ , яку необхідно затратити на розрив міжатомних зв'язків для утворення двох берегів тріщини (або подальшого розвитку тріщини). Таким чином, стан рівноваги тріщини визначає умова:  $U + W_M = P + \gamma$ .

Енергетична умова старту тріщини має вигляд:  $U + W_M > P + \gamma$ .

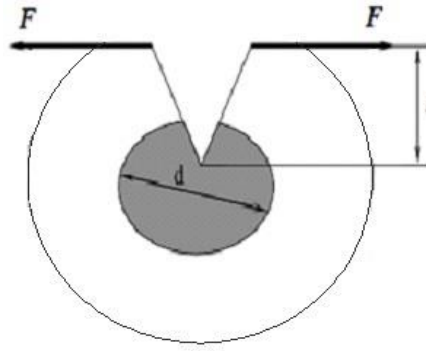


Рисунок 2.1 – Можливий розвиток тріщини:  $F$  – прикладене зовнішнє навантаження;  $l$  – довжина тріщини;  $d$  – лінійний розмір «зони пластичності» в околі вершини тріщини

2) Силова умова розвитку тріщини. Найбільш широке поширення в інженерному застосуванні щодо критерію руйнування мали місце силові підходи, з використанням поняття коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_1$ , який ввів Ірвін Дж.Р. Такі характеристики, як справжня поверхнева енергія тріщини  $\gamma$ , енергія пружних деформацій тіла  $W_M$ , є важко визначуваними на практиці. Коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_1$  відносять до одного з параметрів тріщиностійкості (характеристик руйнування). Цей параметр визначають експериментально, він залежить від прикладеного напруження  $\sigma$ , розміру тріщини та конфігурації твердого тіла. З фізичної точки зору характеристика  $K_1$  відображає концентрацію напружень в тілі внаслідок утворення в ньому тріщини. Або, інакше кажучи, параметр  $K_1$  визначає величину зусиль, що передаються в область у вершині тріщини при дії прикладеного напруження  $\sigma$  (рис. 2.2).

Силова умова старту тріщини має вигляд:

$$K_1 > K_{1c},$$

де  $K_{1c}$  – коефіцієнт тріщиностійкості гірської породи.  $K_{1c}$  – критичне значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_1$ . Параметр  $K_{1c}$  відповідає критичній величині зовнішнього напруження  $\sigma_c$ , при якому відбувається старт тріщини [72].

Для стійкої тріщини виконується умова  $K_1 < K_{1c}$ .

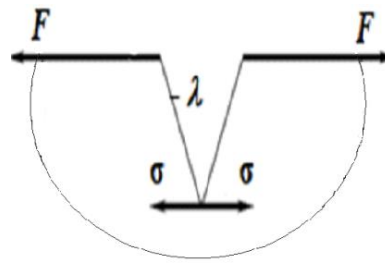


Рисунок 2.2 – Можливий розвиток тріщини:  $F$  – прикладене зовнішнє навантаження;  $\lambda$  – один з берегів тріщини, що стартує;  $\sigma$  – розтягуюче напруження у вершині тріщини

3) Структурно-часовий критерій старту тріщини. Руйнування розглядається як часовий процес, що переводить деяке тіло з одного стану в інший за час  $\tau$ , який називають інкубаційним. Умова старту тріщини з точки зору структурно-часового підходу має вигляд:

$$\frac{1}{\tau} \cdot \int_{t-\tau}^t K(\xi) d\xi \geq K_{1c},$$

де  $t$  – поточний час,  $K(t)$  – локальна інтенсивність силового поля (коефіцієнт інтенсивності напружень) у вершині тріщини,  $K_{1c}$  – критичне значення величини  $K(t)$ , визначається експериментально [26], [27].

Слід зазначити, що підходи до опису умов старту тріщин різні, у даній роботі описано лише деякі.

## 2.4 Тріщиностійкість гірських порід

При здійсненні технологічних задумів і проектів, при вирішенні виробничих завдань у галузі гірничої справи, завжди беруть до уваги фізико-механічні властивості породи конкретного родовища (кар'єр, виробка, шахта). Розглянемо одну з властивостей гірських порід, що пов'язана зі здатністю матеріалу гальмувати поширення у ньому тріщини, також її відносять до однієї з характеристик руйнування (параметрів тріщиностійкості).

Автори [61] дають таке визначення властивості, що нами розглядається:

тріщиностійкість – здатність матеріалу протистояти утворенню тріщин, що характеризується величиною в'язкості руйнування.

Енциклопедичний словник з металургії (за ред. Лякішева Н.П., 2000) пропонує таке визначення: тріщиностійкість [cracking resistance] – здатність матеріалу чинити опір розвитку тріщин (руйнування) при одноразовому, циклічному і уповільненому руйнуванні.

Термінологічний словник з будівництва (ВНДІБ Держбуду СРСР) дає таке трактування: тріщиностійкість – здатність твердого тіла сприймати діючі на нього навантаження без утворення тріщин.

Автори [62] розуміють під тріщиностійкістю здатність матеріалу гальмувати поширення у ньому тріщини. Також автори вважають, що крихке руйнування – це руйнування шляхом спонтанного поширення тріщини без помітних попередніх пластичних деформацій, маючи на увазі, що тріщина є інструмент крихкого руйнування.

Вчений Єфімов В. П. процес руйнування пропонує розбивати на дві фази: руйнування суцільного зразка і надтріснутого. Зробити таке розбиття має сенс, тому що сучасний феноменологічний опис руйнування цих двох етапів не проводиться у рамках єдиного підходу [Єфімов В.П., 2015]. Якщо процес руйнування суцільного зразка при постійній температурі носить нелокалізований характер і контролюється діючим напруженням [Регель В.Р., Слуцкер О.І., Томашевський Е.Є., 1974], то процес розвитку тріщини (руйнування надтріснутого зразка) є вкрай локалізованим і контролюється напруженим станом біля вершини тріщини, що прийнято характеризувати коефіцієнтом інтенсивності напружень у вершині тріщини —  $K_1$  ( $\text{Па} \cdot \sqrt{\text{м}}$  або  $\frac{\text{Н}}{\text{м}^{3/2}}$ ) [63], [72]. Параметр  $K_1$  залежить від прикладеного напруження  $\sigma$ , розміру тріщини і конфігурації тіла. З фізичної точки зору характеристика  $K_1$  відображає концентрацію напружень в тілі внаслідок утворення у ньому тріщини. Або, інакше кажучи, параметр  $K_1$  визначає величину зусиль, яка передається в область у вершини тріщини при дії зовнішнього навантаження (прикладеного напруження  $\sigma$ ).



Як кількісні характеристики опору матеріалу поширення в ньому тріщини приймають такі показники:

- 1) питому енергію  $\gamma$ , що необхідна для утворення вільної поверхні даного матеріалу при заданих умовах;
- 2) граничне значення інтенсивності напружень ( $K_{1c}$ ) при старті тріщини, коли в околі її вершини має місце стан плоскої деформації;
- 3) критичне значення розкриття тріщини  $\delta_k$  в її тупиковій частині.

В інженерній практиці часто використовують характеристику  $K_{1c}$ , що найчастіше називають в'язкістю руйнування (fracture toughness) [28]. На думку вчених [62], така назва для показника  $K_{1c}$  обумовлено тим, що значення характеристики  $K_{1c}$  тим вище, чим більш в'язка, волокниста частина поверхні руйнування. Однак поняття «в'язкість руйнування» є більш широким і характеризує взагалі ресурс пластичності даного матеріалу при його руйнуванні. Мірою цього ресурсу пластичності — в'язкості руйнування — служить ступінь волокнистості злому, ударна в'язкість, відносне подовження або звуження зразка і т.п. (в тому числі, може бути, й величина  $K_{1c}$ ). Оскільки ці дані, крім характеристики  $K_{1c}$ , не є пов'язаними прямо з тріщиною (інструментом крихкого руйнування), то фізично найбільш виправданим для позначення характеристики опору матеріалу поширенню в ньому тріщини є термін «тріщиностійкість» [62]. Надалі в цій роботі будемо користуватися для позначення характеристики опору матеріалу поширенню в ньому тріщини поняттям «тріщиностійкість  $K_{1c}$ ».

Критичне значення параметра  $K_{1c}$  відповідає критичній величині зовнішнього навантаження, при якій відбувається старт тріщини в тіло матеріалу або гірської породи.

Реальні умови експлуатації і видобутку гірських порід завжди передбачають наявність деякого рідкого або газового середовища. Це середовище проникає в деформоване тіло (елемент виробки) через його порушення цілісності — дефекти (макро- або мікротріщини, межі зерен, включень). Особливо інтенсивно середовище взаємодіє з ділянками тіл, що деформовані за межу пружності. До

таких ділянок відносяться окіл різких концентраторів напружень (тріщини, загострені порожнини, жорсткі включення та ін.). Саме в таких околах середовище, змінюючи фізико-механічні властивості деформованого матеріалу або породи, в першу чергу їх опір зародженню чи поширенню тріщини, значно впливає на експлуатаційні властивості породи в цілому. Тому виникла пряма необхідність у визначенні тріщиностійкості  $K_{1C}$  для гірської породи, з урахуванням її значень при заданих умовах його експлуатації або видобутку.

Найбільш простим, як уже зазначалося, в практичному застосуванні є критерій Гриффитса-Ірвіна.

Розглянемо умову локального руйнування або старта тріщини (критерій Ірвіна, 1958)

$$K_1(P_{\text{lim}}, a) = K_{1C}, \quad (2.2)$$

де  $K_1(P, a)$  – коефіцієнт інтенсивності напружень, що залежить від конфігурації тіла, характерного лінійного розміру тріщини  $a$  й конфігурації тріщини, величини діючого навантаження  $P$ ;

$P_{\text{lim}}$  – граничне значення зовнішнього навантаження для тіла з тріщиною, тобто таке мінімальне значення навантаження  $P$ , при досягненні якого настає поширення тріщини;

$K_{1C}$  – значення тріщиностійкості матеріалу (критичне значення коефіцієнта  $K_1$ ) в умовах плоскої деформації [62].

Напружений стан в тілі вважається симетричним відносно площини тріщини і описується методами лінійної теорії пружності [62]. При цьому можна показати [28,62,63], що коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_1$  визначається формулою:

$$K_1 = \lim_{r \rightarrow 0} \left( \sqrt{2\pi \cdot r} \cdot \sigma_z(r, \alpha, 0) \right),$$

де  $r$  – мала відстань по нормалі  $\vec{n}$  між деякою точкою тіла  $M$  і контуром тріщини  $C$  (рис. 2.3);

$\sigma_z(r, \alpha, 0)$  – нормальні розтягальні напруження  $\sigma_z(r, \alpha, z)$ , що діють в площині  $z = 0$ ;

$Oraz$  – циліндрична система координат, обрана так, що площина  $z = 0$  співпадає з площиною тріщини;

$R_0(\alpha)$  – радіус-вектор контуру тріщини;

$R(\alpha)$  – радіус-вектор лінії перетину поверхні зони передруйнування з площиною  $z = 0$ .

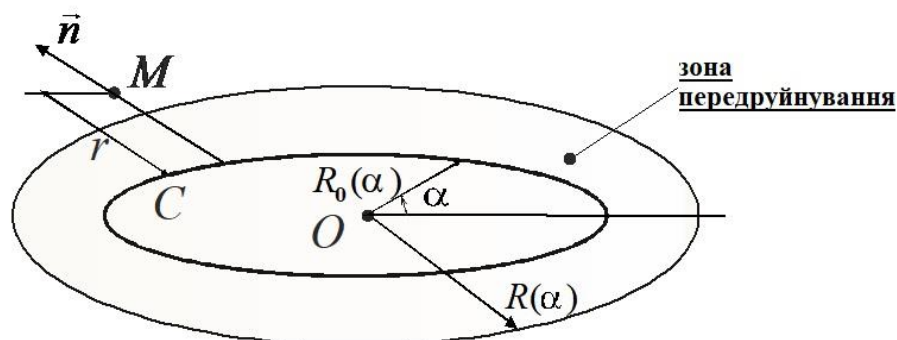


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення перетину тіла з тріщиною площиною, що співпадає з площиною тріщини

Відомі в літературі методи експериментального визначення тріщиностійкості гірських порід можна умовно поділити на групи:

1. методи, що передбачають встановлення кореляцій між коефіцієнтом тріщиностійкості та іншими фізико-механічними властивостями гірської породи, які легко визначаються або вже відомі (твердість, ударна в'язкість, межа міцності та ін.);
2. методи вимірювання незворотної роботи, що витрачається на утворення одиниці вільної поверхні гірської породи в результаті посування тріщини або прями методи вимірювання щільності енергії руйнування  $\gamma$ ;
3. методи, що базуються на використанні вже існуючих рішень задач лінійної механіки руйнування про граничну рівновагу тіла з макротріщиною.

Розробка методів першої групи ускладнена тим, що не для всіх матеріалів можлива вищеписана кореляція [63], в цьому напрямку дослідження ведуться [29]. Методи другої і третьої груп ґрунтуються на вимірах силових і геометричних

параметрів, що характеризують процес поширення тріщини в даному зразку. Дані методи розвинені досить успішно [62].

Визначення тріщиностійкості більшістю рекомендованих методик передбачає випробування зразків порід в лабораторних умовах [60], [62]. При цьому характеристики тріщиностійкості визначають переважно при нерівноважних механічних випробуваннях і у випадках, коли необхідні більш детальні дані про процес руйнування, - при рівноважних випробуваннях.

Тріщиностійкість  $K_{1C}$  є характеристикою міцності матеріалу і визначається, як правило, експериментально. Для металів методи визначення тріщиностійкості існують досить давно і затверджені у вигляді стандартів [62], широко апробовані і мають об'єктивні критерії оцінки достовірності отриманих результатів. Стосовно до гірських порід і вугілля, на жаль, цього поки сказати не можна. Такий стан пояснюється не тільки особливостями їх будови, специфічністю застосовуваного обладнання, трудомісткістю самого процесу визначення тріщиностійкості  $K_{1C}$ , великою кількістю факторів, що впливають на достовірність отриманих результатів, а й значною мірою недостатнім використанням методів механіки руйнування для опису руйнування вугілля і гірських порід. Успішні спроби визначення кореляційних залежностей між тріщиностійкістю й широко використовуваним для гірських порід міцності показником – контактної міцністю, мали місце [65], але для вугілля були непридатні. Було виявлено, що для крихких гірських порід коефіцієнт тріщиностійкості приймає значення в межах  $(0,6 - 3,5) \cdot 10^6 \text{ Н/м}^{\frac{3}{2}}$  [63]. Взаємозв'язок тріщиностійкості гірських порід  $K_{1C}$  і границі міцності їх на стиск  $\sigma_{CT}$ , що отримана в лабораторіях ІГД ім. О.О. Скочинського, наведена в таблиці 2.1 [Каркашадзе Г.Г., 2004], на основі якої був побудований графік, зображений на рисунку 2.4.

У результаті статистичної обробки даних, наведених в таблиці 2.1, була отримана залежність

$$K_{1C} = 0,013 \cdot \sigma_{CT} \cdot 10^6, \quad \frac{\text{Н}}{\text{м}^{\frac{3}{2}}} \quad (2.3)$$

Коефіцієнт кореляції при цьому склав  $r = 0,89$ , коефіцієнт варіації  $V = 17,9\%$ , що свідчить про адекватність залежності (2.3) з експериментальними даними. Інформація взята зі статті [64].

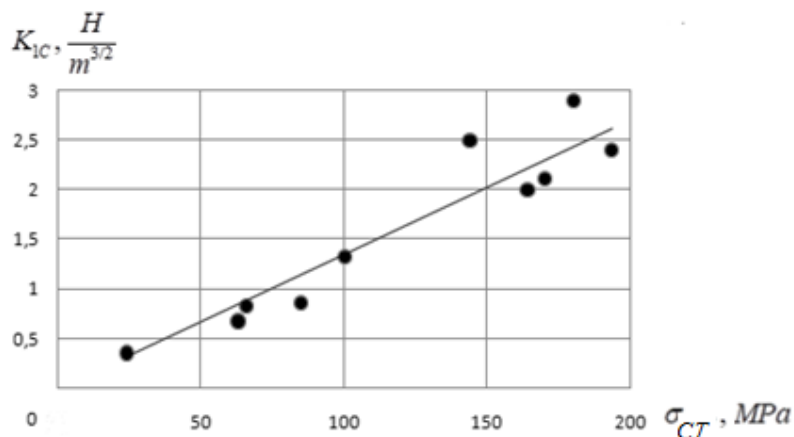


Рисунок 2.4 — Взаємозв'язок тріщиностійкості гірських порід  $K_{IC}$  і межі міцності їх на стиск  $\sigma_{CT}$

У зв'язку зі складністю визначення тріщиностійкості через велике якісне розмаїття зразків вугілля так і залишилися недослідженими. Тому для визначення тріщиностійкості вугілля  $K_{IC}$  можна рекомендувати в першому наближенні формулу (2.3).

Таблиця 2.1 — Взаємозв'язок тріщиностійкості гірських порід і межі міцності їх на стиск

Порода	$\sigma_{ст}$ , МПа	$K_{1c} \cdot 10^6$ , Н/м <sup>3/2</sup>
Пісковик	85,2	0,86
Вапняк (Альмінсько-Бадракське родовище)	24,3	0,35
Гранит (Вуснелінське родовище)	144,1	2,49
Мармур (Пуштулінське родовище)	63,2	0,67
Діорит	193,6	2,39
Скарн (родовище «Схід-2», проба № 153)	164,3	1,99
Пісковик (шахта «Юнком»), закрита з 2011 року	66,1	0,82
Пісковик (шахта «Гірська»)	100,6	1,32
Скарни (родовище «Схід-2», проба № 89)	170,3	2,11
Руда шеелітсульфітна № 1 (родовище «Схід-2», проба № 92)	180,4	2,89

## 2.5. Управління динамічним станом гірського масиву

На даний час відомо досить багато способів, розроблено багато методик по щадному, корисному використанню надр Землі [20], [23], [62]. Проводяться заходи щодо досягнення безпечної роботи людей і попередження ГДЯ в гірничих виробках [23], [47], [62]. Враховуються властивості гірських порід при прийнятті технологічних рішень [62].

Для оцінки стану напружено-деформованого стану гірського масиву й процесів, що відбуваються в ньому і викликані гірничими роботами, в геомеханіці використовують такі методи: спостереження в натурних умовах, аналітичні осмислення отриманих даних, експерименти в гірському масиві та на моделях з натурних, еквівалентних і оптично-активних матеріалів.

Моделювання процесу дозволяє проводити експерименти до повного обвалення виробок, при цьому свідчення, що реєструються датчиками і приладами, обробляються і дають повну картину розподілу напружень і деформацій в масиві на різних етапах гірничих робіт [23], [62].

Недоторканий вугільний пласт і осередки небезпеки ГДЯ існують в геологічному часі: техногенна діяльність людини переводить їх в історичний час, змінюючи тим самим просторово-часовий континуум. Діяльність людини носить локальний характер, реакція пластів і осередків небезпеки ГДЯ також має локальний характер. Все це дозволяє для побудови фізичних та математичних моделей використовувати класичні теорії (теорію пружності, механіку твердого тіла, що деформується, термодинаміку і т.д.), розглядаючи поведінку пластів і зон небезпеки ГДЯ в реальному часі [23], [31].

## **2.6 Механізм руху тріщини у вуглепородному масиві**

Відомим є той факт, що у вершині тріщини в твердому тілі утворюється зона з підвищеною концентрацією напружень [30], [31]. Реалізуючи надлишок енергії в масиві, тріщина, розвиваючись, частково зменшує ці напруження і створює в мікрооб'ємах деяке пошкодження матеріалу.

Температура в цих мікрооб'ємах різко зростає і змінює структуру вугілля в деякій області поблизу тріщини. У далеких від вершини тріщини областях утворюються мікродефекти, концентрація яких збільшується, і в момент їх злиття (очевидно, часткового) тріщина стрибкоподібно зростає по «ослабленому» матеріалу. Така ж картина, найчастіше, спостерігається і при розвитку макротріщини в реальному вугільному масиві. Макротріщини, орієнтуючись в просторі залежно від прикладеного поля напружень і особливостей вугілля, розвивається широким фронтом, і її устя виражено лише в макроскопічному сенсі. Мікроскопічно устя ділиться на безліч тріщин, що на окремих етапах проростають самостійно, а потім зливаються між собою. При цьому в усті кожної з тріщин утворюється локальний мікрооб'ємах ослабленого матеріалу, й тріщини

отримують можливість незалежного руху. На певному етапі розвитку тріщин може відбуватися злиття окремих локальних мікрооб'ємів в їх вершинах і, як результат, буде спостерігатися дискретний рух макротріщини. Після цього, як правило, відбуваються зупинка фронту тріщини, розвиток окремих мікротріщин, їх злиття і новий стрибок макротріщини. Модель деякою мірою пояснює появу таких особливостей, як борозенки, сходинки відколу і зони зі зміненою структурою матеріалу [23].

Механізм руху макротріщини з урахуванням наявності в вугільному пласті метану буде, природно, мати свої особливості. У недоторканому вугільному масиві при рівновазі, що встановилася, метан буде знаходитися у вільному стані в порах і тріщинах. При тектонічних порушеннях, землетрусах та інших природних явищах в рухомих мікротріщинах метаногенерація спільно з механохімічними ефектами буде сприяти появі мікротріщин самого різного розміру [23].



## **РОЗДІЛ 3 УЗАГАЛЬНЕНА УМОВА СТАРТА ТРІЩИНИ, ЩО ІНІЦІЙОВАНИЙ КОЛИВАННЯМ У ПОРОДНОМУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

Розглянуто різні підходи до умов старту тріщини, що є концентратором напружень в масиві.

Дана проблема розглядається з позиції можливого пояснення (розуміння) експериментально виявленого факту: при збільшенні амплітуди коливань в певному інтервалі частот підвищується ймовірність настання динамічних явищ в гірничих виробках.

### **3.1 Умова старту тріщини при гармонійному навантаженні**

Будемо розглядати одиночну тріщину в безмежному просторі, що знаходиться в нестационарному полі напружень. Потрібно визначити умови навантаження, при яких розміри даної тріщини можуть збільшитися.

Приймаються такі допущення: середовище пружне; тріщина дискова; руйнування крихке нормального відриву; напруження є нормальним до площині тріщини, являє собою суму квазістатичній і гармонійній складових; ефекти втоми в гірській породі не враховуються.

Як відомо, тріщина є порушенням суцільності середовища, що викликає концентрацію напружень в області, що примикає до її вершини. Згідно силовому критерію розвитку тріщини величина напруження в вершині тріщини може перевищити межу міцності матеріалу (згідно з критерієм Ірвіна - перевищити граничне значення коефіцієнта інтенсивності напруження), в результаті чого відбувається ріст тріщини, створення умов для утворення нових тріщин і, як наслідок, руйнування певного обсягу матеріалу.

Існують різні підходи до встановлення критеріїв, що визначають умови руйнування при дії напружень, що змінюються в часі і просторі. В роботі [26]

запропоновано найбільш загальний критерій, що базується на просторово-часовому підході до опису руйнування:

$$\frac{1}{\tau \cdot d} \cdot \int_{x_0-d}^{x_0} \int_{t_0-\tau}^{t_0} \sigma_1(x, t) dt dx \geq \sigma_{1c}, \quad (3.1)$$

де  $\sigma_1(x, t)$  – головне напруження;  $\sigma_{1c}$  – міцність на розрив;  $\tau$  – часовий параметр, що характеризує затримку відгуку матеріалу, що руйнується, на розглянутому структурному рівні;  $d$  – параметр довжини;  $x$  – координата вздовж осі, що перпендикулярна до головного напруження;  $t$  – час;  $x_0, t_0$  – координата точки і момент часу руйнування.

Застосовуючи умову (3.1) поблизу вершини тріщини, де силове поле однозначно визначається величиною коефіцієнта інтенсивності напруження  $K_1(t)$ , маємо  $\sigma(x, t) = \frac{K_1(t)}{\sqrt{2\pi x}}$  і, вибираючи досить формально параметр  $d = \frac{2K_{1c}}{\pi \cdot \sigma_{1c}^2}$ , де  $K_{1c}$  – критичне значення коефіцієнта інтенсивності напруження  $K_1$  (коефіцієнт тріщиностійкості), автори Morozov N.F., Petrov Yu.V отримали умову руйнування у вигляді:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} K(t) dt \geq K_{1c}. \quad (3.2)$$

Нерівність (3.2) називають ще структурно-часовим критерієм [26], [27].

Коефіцієнт інтенсивності напруження висловимо через регулярне головне напруження  $\sigma_1$  для дискової тріщини з характерним розміром (радіусом)  $l$ . Тоді з (3.2) отримаємо умову старту тріщини при даному рівні напружень:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} \sigma_1(t) dt \geq \frac{\sqrt{\pi} \cdot K_{1c}}{2 \cdot \sqrt{l}}. \quad (3.3)$$

У загальному випадку в породному масиві, що розробляється, діють не тільки квазістатичні напруження, зміни яких в просторі і часі викликаються проведенням підземних виробок і здійсненням очисних робіт, а й напруження стиску-розтягнення, що швидко змінюються в пружних хвилях, виникають при ударних впливах на масив та генеруються всередині масиву при його крихкому руйнуванні. При цьому в конкретній точці масиву при одночасній дії

квазістатичних напружень і пружній хвилі тензор напружень  $T_{\sigma(t)}$ , що діє в околі тріщини, являє собою суму тензорів квазістатичних напружень  $T_{KC(t)}$  і напружень у хвилі  $T_{B(t)}$ :

$$T_{\sigma(t)} = T_{KC(t)} + T_{B(t)}.$$

Напруження, що є нормальним до площині тріщини, в околі моменту старту тріщини представимо у вигляді:

$$\sigma_1(t) = \sigma_0 + k \cdot (t - t_0) + a \cdot \cos[2\pi\mathcal{G} \cdot (t - t_0) + \varphi_0]. \quad (3.4)$$

Тут  $\sigma_0 + k \cdot (t - t_0)$  – складова напруження, що не пов'язана з коливаннями;

$k = \left( \frac{d\sigma}{dt} \right)_{t=t_0}$  – швидкість росту квазістатичних напружень;

$a, \mathcal{G}, \varphi_0$  – амплітуда, частота і фаза в момент старту тріщини.

Підставляючи (3.4) в (3.3), після перетворень отримаємо умову, що виконується в момент старту тріщини з урахуванням впливу пружних коливань:

$$a \cdot \sin c(\pi \cdot \tau \cdot \mathcal{G}) \cdot \cos(\varphi_0 - \pi \cdot \tau \cdot \mathcal{G}) + \sigma_0 - \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot k \geq \frac{\sqrt{\pi} \cdot K_C}{2 \cdot \sqrt{l}}.$$

Або, вибираючи значення фази  $\varphi_0 = \pi \cdot \tau \cdot \mathcal{G} - \pi \cdot \lfloor \tau \cdot \mathcal{G} \rfloor$ , для якого перший доданок в лівій частині досягає свого максимального значення, отримуємо:

$$a \cdot \sin c(\pi \cdot \tau \cdot \mathcal{G}) \cdot \cos(\pi \cdot \lfloor \tau \cdot \mathcal{G} \rfloor) + \sigma_0 - \frac{1}{2} \cdot \tau \cdot k \geq \frac{\sqrt{\pi} \cdot K_C}{2 \cdot \sqrt{l}}, \quad (3.5)$$

де  $\lfloor \tau \cdot \mathcal{G} \rfloor$  - ціла частина  $\tau \cdot \mathcal{G}$ , що округлена до найближчого цілого в менший бік.

Перевагою (3.5), як наслідок (3.1), (3.2), є можливість його використання, як при високих, так і при низьких (включаючи  $\mathcal{G} = 0$ ) частотах коливань.

Інкубаційний час  $\tau$  не є однозначно певним параметром і його значення може по-різному вибиратися й інтерпретуватися [26], [27]. У будь-якому випадку  $\tau$  слід розглядати (як зазначалося вище) як параметр, що характеризує затримку відгуку матеріалу, що руйнується, на розглянутому структурному рівні при нестационарному навантаженні. Коли критеріальне співвідношення виражено

через повне напруження, параметр  $\tau$  визначається як час передачі енергії між сусідніми елементарними структурами руйнування з характерним розміром  $d$ . Якщо ж використовується тільки регулярна складова напруження, як в (3.3), то оцінити час відгуку можна на основі рішення задачі про падіння ступінчастої хвилі розширення на тріщину кінцевої довжини. Чисельний розв'язок такої задачі і її аналіз [26], [27], [32] показав, що коефіцієнт інтенсивності напруження в вершині тріщини монотонно зростає, досягаючи максимуму в момент приходу хвилі Релея з протилежної вершини, і далі коливається біля його стаціонарного значення. На цій підставі приймемо:  $\tau = \frac{l}{c_R}$ , де  $c_R$  – швидкість хвилі Релея.

Тоді, вводячи такі безрозмірні величини:

$$\bar{l} = \frac{l\mathcal{G}}{C_R}; \bar{a} = \frac{a}{|\sigma_0|}; \alpha = \frac{k}{|\sigma_0|\mathcal{G}}; K_{cv} = \frac{K_{1c}}{2|\sigma_0|} \sqrt{\frac{\pi\mathcal{G}}{C_R}}, \quad (3.6)$$

перетворимо (3.5) до вигляду:

$$\bar{a} \operatorname{sinc}(\pi\bar{l}) \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor) \geq \frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha\bar{l}}{2} - \operatorname{sign}(\sigma_0). \quad (3.7)$$

Тут  $\operatorname{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$  – кардинальний синус,

$\lfloor \bar{l} \rfloor$  – ціла частина  $\bar{l}$ , округлена до найближчого цілого значення в менший бік.

Крім того, повинна виконуватися умова:

$$\frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha\bar{l}}{2} - \operatorname{sign}(\sigma_0) \geq 0. \quad (3.8)$$

Останнє обумовлено тим, що, коли (3.8) не виконується, старт для тріщини відповідної довжини може статися і без впливу коливального навантаження.

Також слід врахувати наступне. У цитованій раніше роботі [32] показано, що в разі дифракції гармонійної хвилі на дисковій тріщині коефіцієнт інтенсивності напруження  $K_1$  стає істотно менше відповідного статичного значення, коли

$\frac{l\vartheta}{C_p} > 1,2$ , що, очевидно, пов'язане з блокуванням поширення коливань тріщиною,

де  $C_p$  – швидкість поздовжніх хвиль,  $C_s$  – швидкість поперечних хвиль,  $C_R$  – швидкість хвилі Релея.

Отже, формальне виконання умови (3.7) для досить великих тріщин (або високих частот) не слід однозначно трактувати як виконання умов старту.

Враховуючи, що  $\frac{C_s}{C_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}}$  і використовуючи апроксимацію

$$\frac{C_R}{C_s} = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} \quad [66], [67] \text{ із зазначеної умови при значенні коефіцієнта}$$

Пуассона  $\nu < 0,3$ , «великими» слід вважати тріщини, для яких приведена длина

$\bar{l} = \frac{l\vartheta}{C_R} > 2,2$ . Для зручності аналізу, додатково вибираючи як масштаб

напруження  $\frac{K_{1c}}{2} \sqrt{\frac{\pi\vartheta}{C_R}}$ , введемо безрозмірні величини:

$$\bar{\bar{\sigma}}_0 = \frac{2\sigma_0}{K_{1c}} \sqrt{\frac{C_R}{\pi\vartheta}}; \quad \bar{\bar{a}} = \frac{2a}{K_{1c}} \sqrt{\frac{C_R}{\pi\vartheta}}; \quad \bar{\bar{\alpha}} = \frac{2k}{K_{1c}\vartheta} \sqrt{\frac{C_R}{\pi\vartheta}}. \quad (3.9)$$

Використовуючи (3.9), умови (3.7) і (3.8) можна представити у вигляді:

$$\bar{\bar{a}} \operatorname{sinc}(\pi\bar{l}) \cos(\pi[\bar{l}]) \geq \frac{1}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\bar{\bar{\alpha}}\bar{l}}{2} - \bar{\bar{\sigma}}_0, \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\bar{\bar{\alpha}}\bar{l}}{2} - \bar{\bar{\sigma}}_0 \geq 0. \quad (3.11)$$

Зауважимо, що

$$K_{cv} = \frac{\operatorname{sign}(\sigma_0)}{\bar{\bar{\sigma}}_0}; \quad \bar{\bar{\sigma}}_0 = \frac{\operatorname{sign}(\sigma_0)}{K_{cv}}; \quad \bar{\bar{a}} = \frac{\bar{a}}{K_{cv}}; \quad \bar{\bar{\alpha}} = \frac{\bar{\alpha}}{K_{cv}}. \quad (3.12)$$

Рівність в (3.7) або (3.10) визначає узагальнену умову старту тріщини, що ініціює коливання в породному напружено-деформованому середовищі.

При введенні безрозмірних величин (3.6) передбачається, що  $\sigma_0 \neq 0$ , але (3.7) справедливе й коли  $\sigma_0 = 0$ , тільки при поверненні до розмірних величин слід в (3.6) використовувати не  $\sigma_0$ , а, взагалі, будь-яку постійну з розмірністю напруження, наприклад  $1 \text{ Па}$ . Однак в цьому випадку простіше використовувати нерівності (3.10), (3.11).

Якщо величини  $K_{lc}, c_R, \sigma_0, k, \mathcal{G}$  сталі, то величини  $K_{cv}$  і  $\alpha$  (або  $\bar{\sigma}_0$  і  $\bar{\alpha}$ ) також є сталими. Тоді змінними в критеріальній умові (3.7) є тільки  $\bar{l}$  і  $\bar{a}$ , тобто старт тріщини з довжиною  $\bar{l}$  визначається тільки амплітудою коливань  $\bar{a}$ . Зв'язок між зазначеними величинами може бути отриманий як розв'язок рівняння (3.7).

З нерівності (3.7) (формально простіше висловити  $\bar{a}$  як функцію змінної  $\bar{l}$ ) можна отримати:

$$\bar{a}(\bar{l}) = \frac{\frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha \bar{l}}{2} - \text{sign}(\sigma_0)}{\text{sinc}(\pi \bar{l}) \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor)}, \quad (3.13)$$

$$\text{де } \text{sinc}(\pi \bar{l}) \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor) \neq 0 \quad (3.14)$$

$$\text{і } \frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha \bar{l}}{2} - \text{sign}(\sigma_0) \geq 0. \quad (3.15)$$

У той же час неоднозначність (3.13) не дозволяє застосовувати рівність безпосередньо і вимагає проведення попереднього дослідження.

Залежність  $\bar{l}(\bar{a})$  може бути також знайдена в результаті розв'язування трансцендентного рівняння (3.7). При цьому при будь-якому значенні  $\bar{a}$  відповідне йому значення  $\bar{l}$  визначається як найменший позитивний корінь (3.7), що задовольняє умові (3.15).

Далі будуть застосовуватися обидва зазначених підхода до визначення зв'язку між амплітудою коливань  $\bar{a}$  і довжиною тріщини  $\bar{l}$ .

### 3.2 Дослідження умови старту тріщини при постійній квазістатичній складовій напруження ( $\alpha = 0$ )

Нагадаємо, що величина  $\alpha = \frac{k}{|\sigma_0| \mathcal{G}}$ , де  $\sigma_0$  – напруження,  $k = \frac{d\sigma}{dt} \Big|_{t=t_0}$  – швидкість росту квазістатичних напружень,  $\mathcal{G}$  – частота коливань в момент старту тріщини.

Спочатку розглянемо випадок, коли в околі тріщини, крім коливального навантаження, діє тільки постійне розтягуюче напруження, тобто в (3.4)  $\sigma_0 > 0$  і  $k = 0$ . Відповідно, тоді  $\text{sign}(\sigma_0) = 1$ ,  $\alpha = 0$  і умови (3.7) і (3.13) приймають вигляд:

$$\bar{a} \text{sinc}(\pi \bar{l}) \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor) \geq \frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} - 1, \quad (3.16)$$

$$\bar{a}(\bar{l}) = \frac{\cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor)}{\text{sinc}(\pi \bar{l})} \left( \frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} - 1 \right), \quad (3.17)$$

$$\text{де } \bar{l} \neq 1, 2, \dots \text{ і } 0 < \bar{l} \leq K_{cv}^2 \quad (3.18)$$

Графіки функції (3.17) для різних значень  $K_{cv}$  показані на рис. 3.1. Для кривої  $K_{cv} = 0,8$  шуканий зв'язок між приведеною довжиною тріщини  $\bar{l}$  і приведеною амплітудою коливань  $\bar{a}$  однозначний. Для інших кривих, наведених на рисунку 3.1, одним і тим же значенням  $\bar{a}$  з деякого інтервалу відповідають точки, що лежать на різних гілках графіка функції. Отже, одним і тим же значенням приведеної амплітуди коливань  $\bar{a}$  можуть відповідати різні значення приведеної довжини тріщини  $\bar{l}$ . В цьому випадку для даної амплітуди в якості критичної довжини тріщини слід вибирати найменше значення  $\bar{l}$ , і графік шуканої залежності амплітуди від критичної довжини тріщини слід відповідним чином скоригувати. Особливий інтерес становить ситуація, коли точка, відповідна шуканій залежності, переходить з однієї гілки на іншу. Тоді при відповідному значенні амплітуди критична довжина тріщини змінюється стрибком. На скоригованому графіку залежності  $\bar{a}(\bar{l})$  цієї ситуації буде відповідати

горизонтальний відрізок, що з'єднує точки на двох різних гілках функції (3.17), які лежать ліворуч і праворуч від прямої  $\bar{l} = 1$  (рис. 3.2). Координати лівого кінця цього відрізка  $(\bar{l}_-, a_*)$  можна знайти як точку, в якій похідна до лівої гілки (3.17) дорівнює нулю.

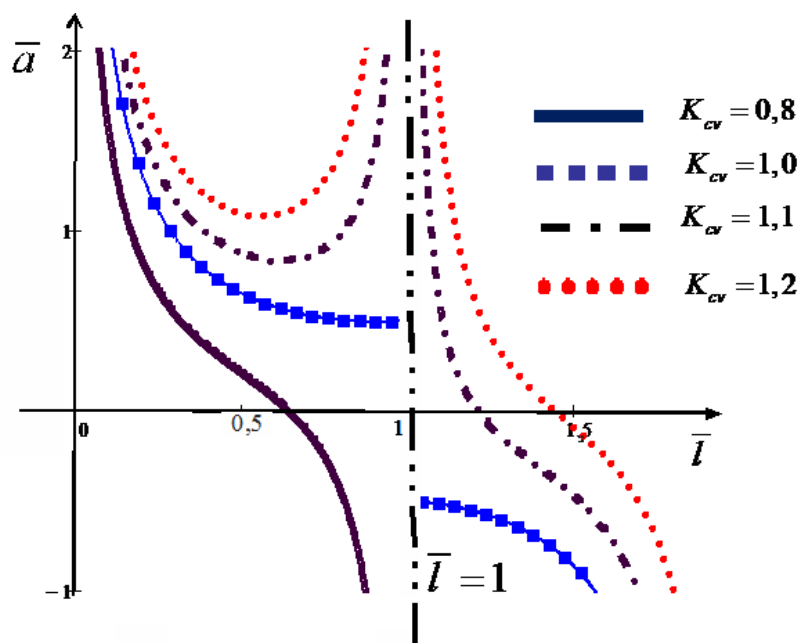


Рисунок 3.1 – Графіки функції  $\bar{a}(\bar{l})$  при різних значеннях  $K_{cv}$

Враховуючи, що

$$\frac{d\bar{a}}{d\bar{l}} = \frac{\pi \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor)}{2\sqrt{\bar{l}} \sin^2(\pi \bar{l})} \cdot \left\{ (K_{cv} - 2\sqrt{\bar{l}}) \sin(\pi \bar{l}) - 2\pi \bar{l} (K_{cv} - \sqrt{\bar{l}}) \cos(\pi \bar{l}) \right\}, \quad \bar{l} \neq 1$$

$$\lim_{\bar{l} \rightarrow 1} \frac{d\bar{a}}{d\bar{l}} = \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor) \cdot \begin{cases} \text{sign}(K_{cv} - 1) \cdot \infty, & K_{cv} \neq 1 \\ \frac{1}{8}, & K_{cv} = 1 \end{cases}, \quad (3.19)$$

для визначення  $\bar{l}_-$  отримуємо трансцендентне рівняння

$$(K_{cv} - 2\sqrt{\bar{l}_-}) \sin(\pi \bar{l}_-) - 2\pi \bar{l}_- (K_{cv} - \sqrt{\bar{l}_-}) \cos(\pi \bar{l}_-) = 0. \quad (3.20)$$

В якості  $\bar{l}_-$  слід взяти найменший позитивний корінь (3.20). Підставляючи знайдене значення  $\bar{l}_-$  в (3.16), знаходимо значення амплітуди  $a_*$ , при якому має



місце стрибок критичної довжини тріщини. Для визначення абсциси правого кінця горизонтальної ділянки кривої  $\bar{l}_+$  необхідно знайти абсцису точки перетину прямої  $\bar{a} = \bar{a}_*$  з другою гілкою функції (3.17), тобто знайти найменший розв'язок трансцендентного рівняння, що більше за 1 (3.16).

Проведені описаним вище чином розрахунки дозволяють побудувати шукану залежність  $\bar{a}(\bar{l})$  для будь-якого значення величини  $K_{cv}$  (рис. 3.2).

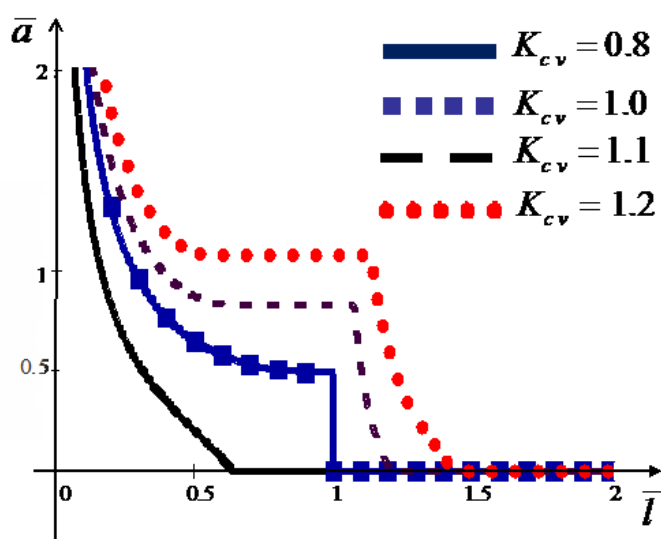


Рисунок 3.2 – Залежності приведеної амплітуди коливань  $\bar{a}$  від критичної довжини тріщини  $\bar{l}$

Попередньо при цьому для кожного значення  $K_{cv}$  обчислюються найменша і найбільша критичні довжини тріщини при її стрибкоподібній зміні. Їх значення, а також відповідні амплітуди коливань наведено на рисунку 3.3.

Безсумнівно, залежність критичної довжини тріщини від амплітуди  $\bar{l}(\bar{a})$  має практичний інтерес і може бути отримана оберненням залежності  $\bar{a}(\bar{l})$  (рис. 3.2). Однак, враховуючи, що при цьому доводиться двічі приблизно шукати коріння рівнянь, простіше відразу розв'язувати трансцендентне рівняння (3.16) щодо амплітуди коливань  $\bar{a}$ .

З наведеного вище аналізу випливає, що для  $K_{cv} \geq 1$  дані криві повинні мати вертикальні ділянки. При наближеному розв'язанні рівняння відхилення від

вертикалі можуть бути обумовлені недостатньою точністю обчислень. Залежності  $\bar{l}(\bar{a})$  для декількох значень  $K_{cv}$  показано на рисунках 3.4 і 3.5.

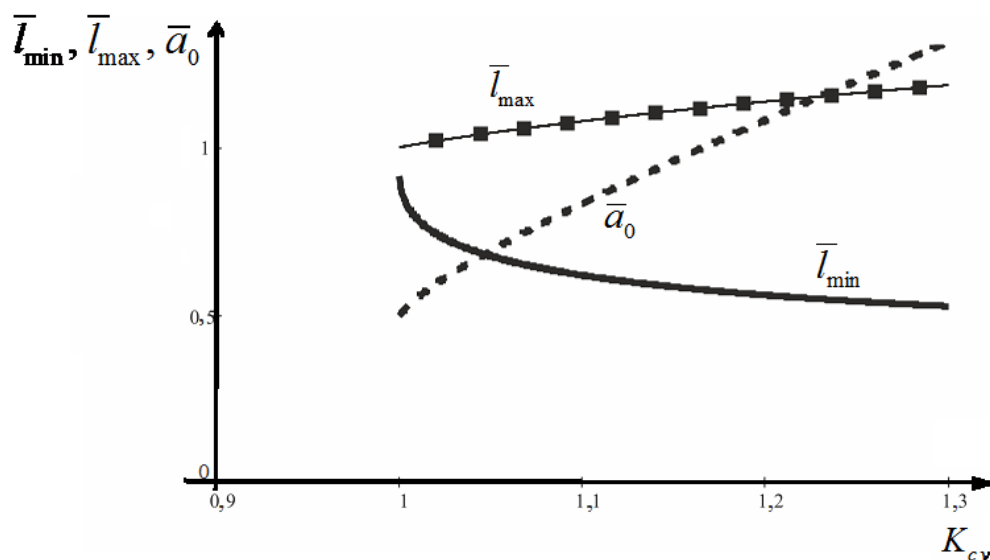


Рисунок 3.3 – Начальне  $\bar{l}_{\min}$  і кінцеве  $\bar{l}_{\max}$  значення критичної довжини тріщини при її стрибкоподібній зміні та амплітуда коливань  $\bar{a}_0$ , що викликали стрибок

З наведених графіків (зокрема, рисунок 3.4) видно, що збільшення амплітуди коливань призводить до нестійкості (виконання умов старту) тріщин меншої довжини. Однак ступінь зменшення критичної довжини тріщини при збільшенні амплітуди істотно змінюється як при зміні амплітуди, так і для різних значень величини  $K_{cv}$ .

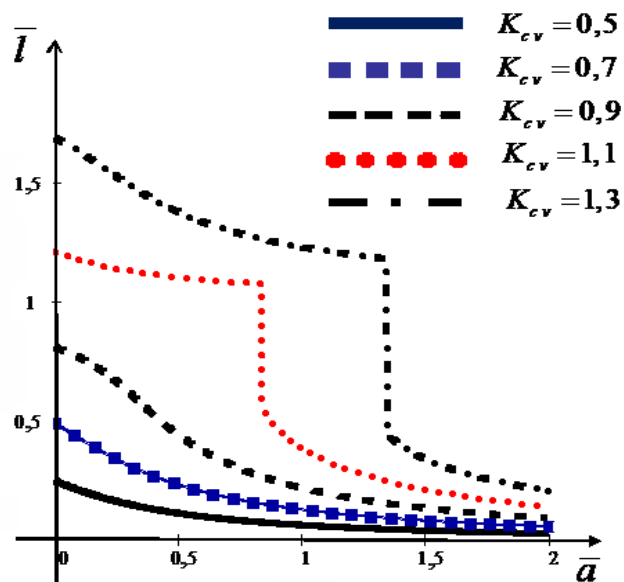


Рисунок 3.4 – Графіки залежності довжини тріщини  $\bar{l}(\bar{a})$  від амплітуди коливань для декількох значень  $K_{cv}$

Як локальну характеристику описаної залежності природно використовувати похідну приведенної амплітуди коливань за приведенною довжиною тріщини  $\frac{d\bar{a}}{d\bar{l}}$ . Відповідні криві наведено на рисунках 3.6 і 3.7.

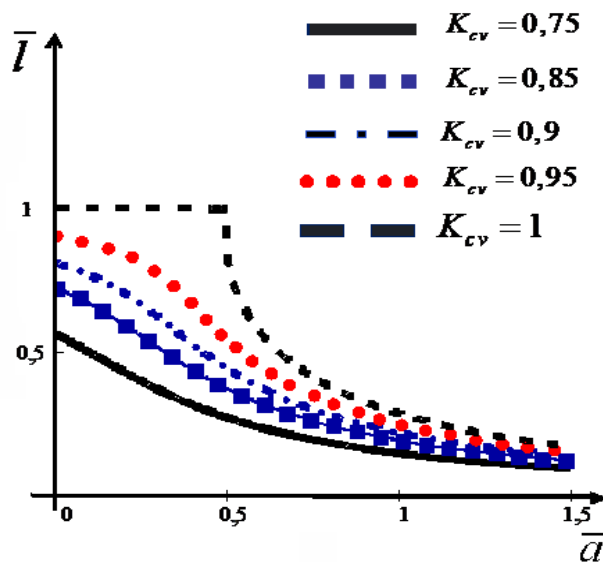


Рисунок 3.5 – Графіки залежності  $\bar{l}(\bar{a})$  для декількох значень  $K_{cv}$

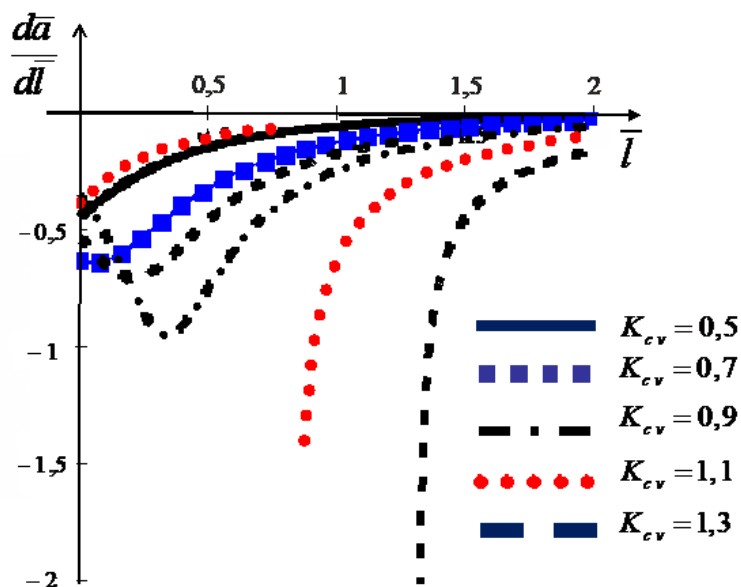


Рисунок 3.6 – Крива залежності похідної амплітуди коливань за довжиною тріщини  $\frac{d\bar{a}}{d\bar{l}}$  при деяких значеннях  $K_{cv}$

У точках, що відповідають стрибкам довжини тріщини, похідні не визначені, а їх граничні значення праворуч дорівнюють мінус нескінченності ( $-\infty$ ), тобто в цих точках спостерігається найбільша чутливість критичної довжини тріщини щодо зміни амплітуди.

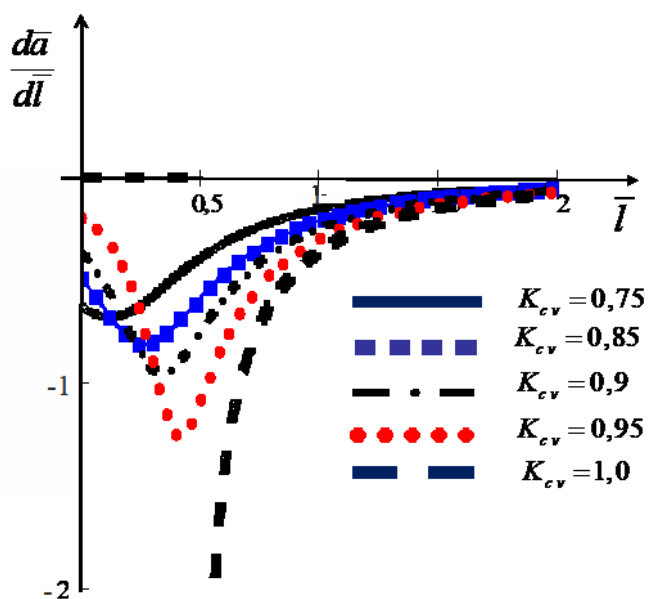


Рисунок 3.7 – Крива залежності похідної амплітуди коливань за довжиною тріщини  $\frac{d\bar{a}}{d\bar{l}}$  при деяких значеннях  $K_{cv}$

Однак слід врахувати, що в практично спостережуваних ситуаціях в масиві мають місце коливання не з однією амплітудою і частотою (точка на осі  $\bar{a}$ ), а коливання, що можна представити у вигляді деякої сукупності гармонійних коливань з різними частотами і амплітудами. Крім того, в більшості випадків амплітуда коливань не перевищує постійного напруження в околі тріщини (відповідно,  $\bar{a}$  не перевищує 1). Тому як характеристику залежності критичної довжини тріщини від амплітуди коливань розглянемо середнє значення похідної довжини тріщини за амплітудою на деякому інтервалі зміни амплітуди  $[0, \bar{a}_0]$ :

$$s(\bar{a}_0, K_{cv}) = \frac{1}{\bar{a}_0} \int_0^{\bar{a}_0} \frac{\partial \bar{l}}{\partial \bar{a}} d\bar{a} = \frac{1}{\bar{a}_0} (\bar{l}(\bar{a}_0, K_{cv}) - \bar{l}(0, K_{cv})). \quad (3.21)$$

Вибір амплітуди  $\bar{a}_0$  в (3.21) не є однозначним. Вплив значення амплітуди  $\bar{a}_0$  на середнє значення похідної довжини тріщини за амплітудою  $s(\bar{a}_0, K_{cv})$  при різних значеннях величини  $K_{cv}$  ілюструють рисунки 3.8 і 3.9. Хоча найбільша чутливість критичної довжини тріщини для величини  $K_{cv} \geq 1$  спостерігається при значеннях інтервалу усереднення, що декілька більше амплітуди стрибка  $\bar{a}_*$ , настільки великі амплітуди по відношенню до вихідного напруження практично спостерігаються вкрай рідко.

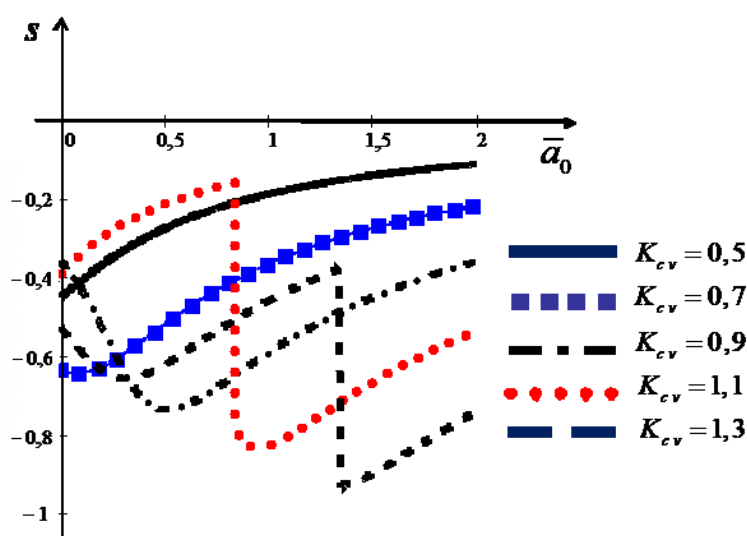


Рисунок 3.8 – Вплив значення амплітуди  $\bar{a}_0$  на середнє значення похідної довжини тріщини за амплітудою  $s(\bar{a}_0, K_{cv})$  при різних значеннях величини  $K_{cv}$

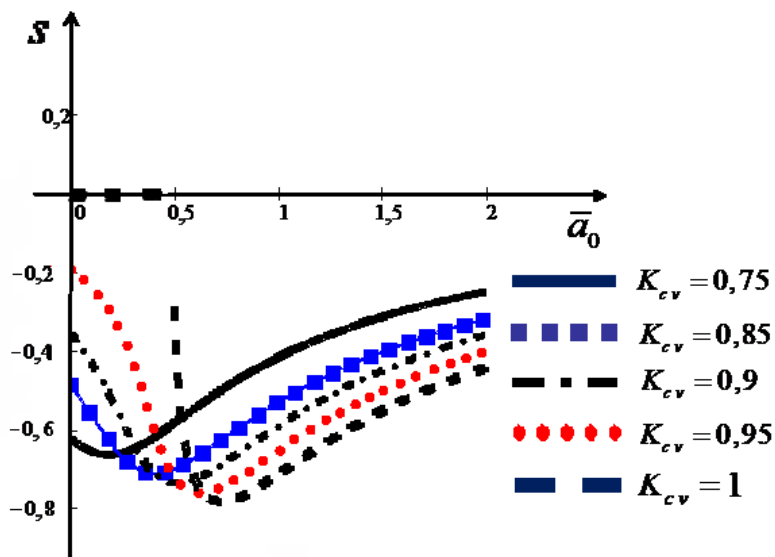


Рисунок 3.9 – Вплив значення амплітуди  $\bar{a}_0$  на середнє значення похідної довжини тріщини за амплітудою  $s(\bar{a}_0, K_{cv})$  при різних значеннях величини  $K_{cv}$

Якщо обмежитися усередненням на проміжку  $[0; 0,5]$ , що відповідає найбільш типовій ситуації, то залежно від характеристики чутливості критичної довжини тріщини  $s(\bar{a}_0, K_{cv})$  до зміни амплітуди від величини  $K_{cv}$  при різних проміжках усереднення приймають вигляд, показаний на рисунку 3.10.

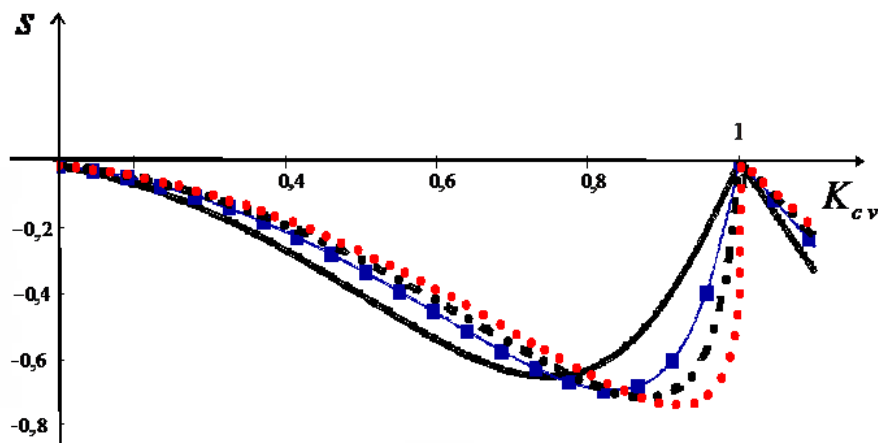


Рисунок 3.10 – Залежності характеристики чутливості критичної довжини тріщини  $s(\bar{a}_0, K_{cv})$  до зміни амплітуди від величини  $K_{cv}$  при різних проміжках усереднення

З наведених графіків видно, що різка зміна критичної довжини тріщини при зростанні амплітуди коливальв відбувається при  $K_{cv} \in (0,8; 1,0)$ . При менших

значеннях величини  $K_{cv}$  вплив амплітуди на критичну довжину тріщини значно слабкіше. При великих значеннях величини  $K_{cv}$  зона різкої зміни переміщується в область значень амплітуд коливань, що практично не реалізуються.

Виходячи з викладеного, як критичне значення пропонується прийняти значення параметра  $K_{cv} = 1$ . При такому значенні, наприклад, збільшення безрозмірної амплітуди на 20% (з 0,5 до 0,6) призводить до зменшення критичної довжини тріщини майже у 2 рази. Також важливо відзначити, що при цьому існує деяка величина амплітуди коливань, до досягнення якої критична довжина тріщини взагалі не змінюється при зростанні амплітуди, а після досягнення різко падає.

Розглянемо далі випадок, коли  $\sigma_0 = 0$ . При цьому залежність (3.17) набуває вигляду:

$$\bar{a}(\bar{l}) = \frac{\pi K_{cv} \sqrt{\bar{l}} \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor)}{\sin(\pi \bar{l})}. \quad (3.22)$$

Графіки функцій  $\bar{a}(\bar{l})$  (3.22) для двох значень величини  $K_{cv}$  показано на рисунку 3.11. Оскільки згідно залежності (3.22),  $\frac{\bar{a}(\bar{l} + 1)}{\bar{a}(\bar{l})} = \sqrt{1 + \frac{1}{\bar{l}}} > 1$ , то мінімуми другої та наступних гілок функції (3.22) лежать вище мінімуму першої гілки для будь-якого значення величини  $K_{cv}$  і, отже, на відміну від розглянутого раніше випадку ( $\sigma_0 > 0$ ), тут стрибок критичної довжини тріщини не спостерігається.

Найменше значення амплітуди  $\bar{a}_{\min}$ , при якому можливий старт тріщини, можна знайти як ординату точки мінімуму першої гілки залежності (3.22).

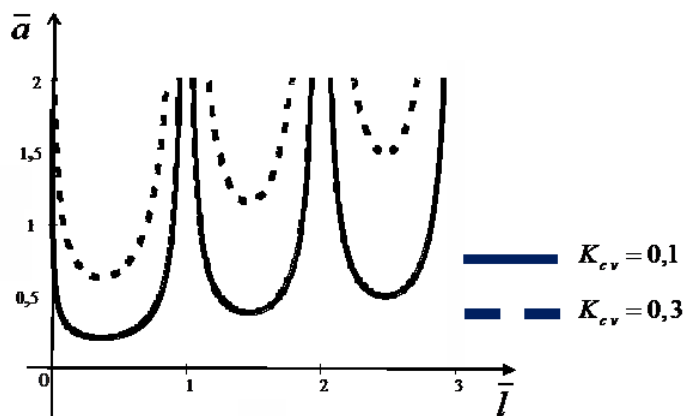


Рисунок 3.11 – Графіки функції  $\bar{a}(\bar{l})$  при значеннях  $K_{cv} = 0,1$  і  $K_{cv} = 0,3$

Оскільки наближене розв'язання рівняння  $\frac{d\bar{a}}{d\bar{l}} = 0 \Rightarrow \sin(\pi\bar{l}) - 2\pi\bar{l} \cdot \cos(\pi\bar{l}) = 0$

надає корінь  $\bar{l} = 0,371$ , то шукане наближене значення  $\bar{a}_{\min} = \bar{a}(0,371) = 2,082K_{cv}$ .

Якщо використовувати другу систему безрозмірних величин (3.12), залежність між приведеною довжиною тріщини  $\bar{l}$  і приведеною амплітудою  $\bar{a}$  можна надати однією кривою (рис. 3.12).

Залежності між цими ж величинами  $\bar{l}$  і  $\bar{a}$ , при відмінних від нуля стискаючих напружень, показано на рисунку 3.13.

Збільшення модуля початкових стискаючих напружень, природно, призводять до необхідності збільшувати амплітуду коливань для створення умов старту (рис. 3.13).

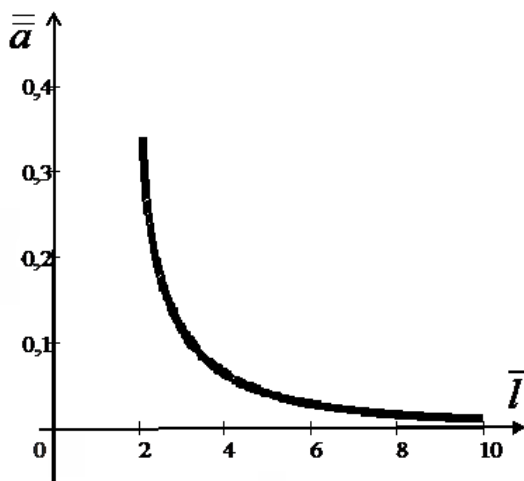


Рисунок 3.12 – Графік залежності  $\bar{l} = \bar{l}(\bar{a})$  при напруженні  $\sigma_0 = 0$



У той же час при зміні амплітуди коливань «швидкість» зміни критичної довжини тріщини мало залежить від величини початкового стискаючого напруження.

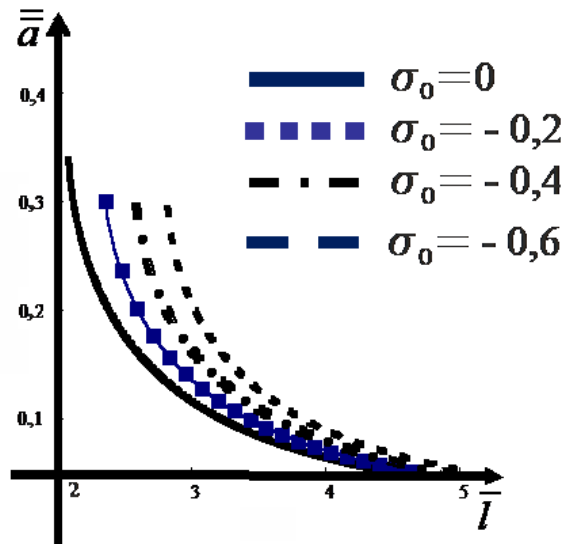


Рисунок 3.13 – Графік залежності  $\bar{l} = \bar{l}(\bar{a})$  при різних напруженнях  $\sigma_0$

### 3.3 Визначення області зміни параметрів, в якій можливий старт тріщини при змінній квазістатичній складовій напруження ( $\alpha \neq 0$ )

Зміна з часом напруженого стану, що не пов'язане з коливаннями, впливає на значення параметрів навантаження, при яких може початися зростання тріщин. В рамках прийнятих припущень така зміна напруження визначається величиною

$$\alpha = \frac{k}{|\sigma_0| \mathcal{G}}, \text{ де } \sigma_0 - \text{напруження, } k = \left. \frac{d\sigma}{dt} \right|_{t=t_0} - \text{швидкість зростання квазістатичних}$$

напружень,  $\mathcal{G}$  – частота коливань в момент старту тріщини.

Пояснимо, як знак величини  $\alpha$  пов'язаний зі знакозмінністю напружень, що діють в масиві. Якщо в околі моменту старту ( $t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t$ ) величина  $\alpha > 0$ , тоді регулярне напруження  $\sigma(t)$  є зростаючою функцією, тобто до моменту старту ( $t < t_0$ ) регулярне напруження  $\sigma$  було нижче  $\sigma(t_0)$ . Якщо регулярне напруження, що діє в породному масиві, є розтягуючим, тоді отримуємо: напруження  $\sigma(t)$

менше напруження  $\sigma(t_0)$ . У разі стискаючого напруження одержуємо: модуль напруження  $|\sigma(t)|$  більше, ніж модуль напруження  $|\sigma(t_0)|$ .

Якщо в околі моменту старту  $(t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t)$  величина  $\alpha < 0$ , то старт відбувається в умовах попереднього моменту старту зменшення напруження (з огляду на те, що регулярне напруження  $\sigma(t)$  є спадною функцією). Тоді до моменту старту регулярне розтягуюче напруження  $\sigma(t)$  більше  $\sigma(t_0)$ . У разі стискаючого напруження модуль стискаючого напруження  $|\sigma(t)|$  менше модуля напруження  $|\sigma(t_0)|$ .

Очевидно, що значення параметра  $\alpha$  можуть бути такими, що умови старту виконуються й при відсутності коливального навантаження. Тому спочатку варто визначити, при яких значеннях параметрів, що впливають, це може мати місце. Для критеріальної умови у вигляді (3.7) дана ситуація можлива, якщо виконується нерівність:

$$\frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha \bar{l}}{2} - \text{sign}(\sigma_0) \leq 0, \quad (3.23)$$

а для критеріальної умови у вигляді (3.10) справедлива така нерівність:

$$\frac{1}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\bar{\alpha} \bar{l}}{2} - \bar{\sigma}_0 \leq 0. \quad (3.24)$$

Далі будемо досліджувати залежність  $\bar{\alpha}(\bar{l})$  (3.13). Відповідні значення безрозмірних величин, що входять в нерівність (3.24), можна обчислити за формулами (3.12).

Спочатку наведемо результати, що отримані раніше для випадку, коли величина  $\alpha = 0$ .

Коли  $\sigma_0 > 0$ ,  $\bar{l} \geq K_{cv}^2$ , то старт тріщини відбувається без коливального навантаження. При  $\sigma_0 > 0$ ,  $\bar{l} < K_{cv}^2$  старт тріщини можливий тільки при наявності коливального навантаження з відповідним значенням амплітуди. При  $\sigma_0 \leq 0$  старт тріщини без коливального навантаження неможливий.

При значеннях величини  $\alpha \neq 0$  нерівність (3.23) можна представити у вигляді:

$$y^3 - \frac{2\text{sign}(\sigma_0)}{\alpha} y + \frac{2K_{cv}}{\alpha} \leq 0 \quad (\text{якщо } \alpha > 0), \quad (3.25)$$

$$y^3 - \frac{2\text{sign}(\sigma_0)}{\alpha} y + \frac{2K_{cv}}{\alpha} \geq 0 \quad (\text{якщо } \alpha < 0). \quad (3.26)$$

Введемо для зручності аналізу функцію:

$$\varphi(y) = y^3 - \frac{2\text{sign}(\sigma_0)}{\alpha} y + \frac{2K_{cv}}{\alpha}. \quad (3.27)$$

Тоді нерівності (3.25) і (3.26) можна записати як:

$$\varphi(y) \leq 0 \quad (\text{якщо } \alpha > 0), \quad (3.28)$$

$$\text{і } \varphi(y) \geq 0 \quad (\text{якщо } \alpha < 0). \quad (3.29)$$

Слід враховувати, що фізичний зміст мають тільки дійсні невід'ємні значення змінної  $y$ , і, крім того,

$$\varphi(0) = \frac{2K_{cv}}{\alpha}; \quad \varphi'(y) = 3y^2 - \frac{2\text{sign}(\sigma_0)}{\alpha}; \quad \varphi'(0) = -\frac{2\text{sign}(\sigma_0)}{\alpha}. \quad (3.30)$$

Нагадаємо формули для розв'язання наведеного кубічного рівняння

$$x^3 + px + q = 0$$

$$\text{Дискримінант - } Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2.$$

$$\text{Допоміжні величини - } \alpha_r = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}; \quad \beta_r = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}}.$$

Корені

$$x_1 = \alpha_r + \beta_r, \quad (3.31)$$

$$x_2 = -\frac{\alpha_r + \beta_r}{2} + i\sqrt{3}\frac{\alpha_r - \beta_r}{2}, \quad (3.32)$$

$$x_3 = -\frac{\alpha_r + \beta_r}{2} - i\sqrt{3}\frac{\alpha_r - \beta_r}{2}. \quad (3.33)$$

Якщо  $Q > 0$ , то рівняння має один дійсний і два комплексні корені;

Якщо  $Q < 0$ , то три дійсних корені;

Якщо  $Q = 0$ , то два різних дійсних корені, один з яких двократний.

Для рівнянь, що відповідають нерівностям (3.25) і (3.26) або рівнянню

$$\varphi(y) = 0, \quad (3.34)$$

$$Q = \left(\frac{K_{cv}}{\alpha}\right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3} \text{sign}(\sigma_0).$$

$$\alpha_r = \sqrt[3]{-\frac{K_{cv}}{\alpha} + \sqrt{Q}}; \quad \beta_r = \sqrt[3]{-\frac{K_{cv}}{\alpha} - \sqrt{Q}}.$$

Розглянемо різні випадки, що визначаються значеннями величини  $\alpha$ , напруженням  $\sigma_0$ , величиною тріщиностійкості  $K_{cv}$ :

I)  $\alpha < 0$ ,

I.1  $\sigma_0 \geq 0$ .

Якщо  $Q \geq 0$ , тоді існує один дійсний корінь, що вираховується за формулою (3.31),  $\varphi(0) < 0$ ,  $\varphi'(y) = 3y^2 - \frac{2}{\alpha} > 0$  і, отже, цей корінь більше нуля, і старт тріщини без коливального навантаження можливий, якщо  $\bar{l} \geq \bar{l}_1$ , де

$$\bar{l}_1 = \left[ \left( \sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha}\right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3}} - \frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^{1/3} + \left( -\frac{K_{cv}}{\alpha} - \sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha}\right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3}} \right)^{1/3} \right]^2. \quad (3.35)$$

Зауважимо, що при  $\alpha \rightarrow 0$  з умови (3.35) випливає умова  $\bar{l} \geq K_{cv}^2$ , що отримана раніше для значення величини  $\alpha = 0$ .

I.2  $\sigma_0 < 0$ .

Дискримінант  $Q = \left(\frac{K_{cv}}{\alpha}\right)^2 + \frac{8}{27\alpha^3}$  може приймати як позитивне, так і негативне значення.

Якщо  $\alpha < -\frac{8}{27K_{cv}^2}$ , тоді  $Q > 0$ , і єдиний позитивний корінь рівняння (3.34)

обчислюється за формулою (3.31) та його значення більше, ніж величина  $\sqrt{-\frac{2}{3\alpha}}$ .

Старт без коливального навантаження можливо, коли  $\bar{l} \geq \bar{l}_2$ , де

$$\bar{l}_2 = \left[ \left( \sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha}\right)^2 + \frac{8}{27\alpha^3}} - \frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{3}} + \left( -\frac{K_{cv}}{\alpha} - \sqrt{\left(\frac{K_{cv}}{\alpha}\right)^2 + \frac{8}{27\alpha^3}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2. \quad (3.36)$$

Якщо значення величини  $\alpha > -\frac{8}{27K_{cv}^2}$ , тоді  $Q < 0$ , дійсних коренів три, але позитивний корінь тільки один, що вираховується за тією ж формулою (3.31) і, відповідно, умова (3.36) залишається в силі.

II)  $\alpha > 0$ ,

II.1  $\sigma_0 \geq 0$ .

Дискримінант  $Q = \left(\frac{K_{cv}}{\alpha}\right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3}$  може приймати як позитивне, так і негативне значення.

Якщо значення величини  $\alpha > \frac{8}{27K_{cv}^2}$ , тоді  $Q > 0$ , і кубічне рівняння має єдиний дійсний корінь. Але так, як  $\varphi(0) = \frac{2K_{cv}}{\alpha} > 0$  і  $\lim_{y \rightarrow -\infty} \varphi'(y) = \lim_{y \rightarrow -\infty} \left(3y^2 - \frac{2}{\alpha}\right) = +\infty$ , тоді цей корінь негативний. Отже, в цьому випадку старт тріщини без додаткового навантаження статися не може.

Якщо значення величини  $\alpha < \frac{8}{27K_{cv}^2}$ , тоді  $Q < 0$  і дійсних коренів три, причому два з них позитивні. Крім того, оскільки  $\alpha_r$  і  $\beta_r$  спряжені, а

$-\frac{q}{2} = -\frac{K_{cv}}{\alpha} < 0$  і відповідно дійсні частини  $\alpha_r$  та  $\beta_r$  позитивні, то найбільший позитивний корінь обчислюється за формулою (3.31), а найменший позитивний за формулою (3.33). Умова старту виконується, коли  $\varphi(y) \leq 0$ , тобто для тріщин з приведеною довжиною  $\bar{l}$ , що задовольняє умові:  $\bar{l}_3 < \bar{l} < \bar{l}_1$ , де  $\bar{l}_1$  обчислюється за формулою (3.35),

$$\bar{l}_3 = \left\{ \frac{\sqrt{\bar{l}_1}}{2} + \frac{i \cdot \sqrt{3}}{2} \left[ \left( \sqrt{\left( \frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3}} - \frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^{\frac{1}{3}} - \left( -\frac{K_{cv}}{\alpha} - \sqrt{\left( \frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^2 - \frac{8}{27\alpha^3}} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \right\}^2. \quad (3.37)$$

Зауважимо, що при значеннях величини  $\alpha \rightarrow +0$  значення приведеної довжини тріщини  $\bar{l}_3 \rightarrow K_{cv}^2$ , а значення приведеної довжини тріщини  $\bar{l}_1 \rightarrow \infty$ , що відповідає отриманому раніше результату для величини  $\alpha = 0$ . Крім того,

$$\lim_{\alpha \rightarrow \frac{8}{27K_{cv}^2} - 0} \bar{l}_1 = \lim_{\alpha \rightarrow \frac{8}{27K_{cv}^2} - 0} \bar{l}_3 = \frac{9K_{cv}^2}{4}, \text{ а } \lim_{\alpha \rightarrow -0} \bar{l}_1 = \lim_{\alpha \rightarrow +0} \bar{l}_3 = K_{cv}^2.$$

II.2  $\sigma_0 < 0$ .

$$Q = \left( \frac{K_{cv}}{\alpha} \right)^2 + \frac{8}{27\alpha^3} > 0, \text{ отже, дійсний корінь єдиний і оскільки}$$

$$\varphi'(y) = 3y^2 + \frac{2}{\alpha} > 0, \quad \varphi(0) = \frac{2K_{cv}}{\alpha} > 0, \text{ тоді цей корінь негативний. Таким чином, в}$$

цьому випадку старт тріщини без додаткового навантаження неможливий. Узагальнюючи отримані вище результати, можна вказати обмеження на параметри, при яких старт тріщини може бути ініційований коливальним навантаженням (таблиця 3.1). Відповідна область для величини  $K_{cv} = 0,8$  обмежена лініями, що показано на рисунку 3.14. Аналогічні області для інших значень величини тріщиностійкості  $K_{cv}$  наведено на рисунку 3.15.

З огляду на дані з таблиці 3.1, для випадку  $K_{cv} = 0,8$  на рисунку 3.14 побудовано криві  $\bar{l}(\alpha)$ , що відокремлюють область (що заштрихована), в якій можливий старт тріщини при коливальному навантаженні.

Таблиця 3.1 – Области значень критичної довжини тріщини  $\bar{l}$ , старт якої може бути ініційований коливальним навантаженням, при напруженні  $\sigma_0$  і змінної квазістатичної складової напруження  $\alpha$

Напруження $\sigma_0$	Змінна квазістатична складова напруження $\alpha$	Довжина тріщини $\bar{l}$	Номер формул для обчислень значень $\bar{l}_i$ , $i = \overline{1,3}$
$\sigma_0 \geq 0$	$(-\infty, 0)$	$(0, \bar{l}_1)$	(3.35)
	$\left(0, \frac{8}{27K_{c9}^2}\right)$	$(0, \bar{l}_3) \cup (\bar{l}_1, \infty)$	(3.35), (3.37)
	$\left(\frac{8}{27K_{c9}^2}, \infty\right)$	$(0, \infty)$	
$\sigma_0 < 0$	$(-\infty, 0)$	$(0, \bar{l}_2)$	(3.36)
	$(0, \infty)$	$(0, \infty)$	

Аналогічні криві для інших значень величини тріщиностійкості  $K_{cv}$  наведено на рисунку 3.15 (штрихування для областей старту опущено).

Порівняємо значення довжин тріщин, що стартують, при статичному навантаженні і при змінних квазістатичних напруженнях. Для цього побудуємо графіки функцій  $\bar{a}(\bar{l})$ , що задані за формулою (3.13), при виконанні умов (3.14) і (3.15), значення величин  $\alpha = 0$  і  $\alpha = 0,2$ , значення величини  $K_{cv}$  візьмемо критичне, що дорівнює 1 (рис. 3.16).

Маємо, що при зміні амплітуди коливань  $\bar{a}$  від 0 до значення 0,695 критичні довжини тріщин  $\bar{l}$  (що стартують) при стаціонарному навантаженні ( $\alpha = 0$ ) менше, чим критичні довжини тріщин  $\bar{l}$  при зростанні квазістатичних напружень ( $\alpha = 0,2$ ) (рис. 3.16).

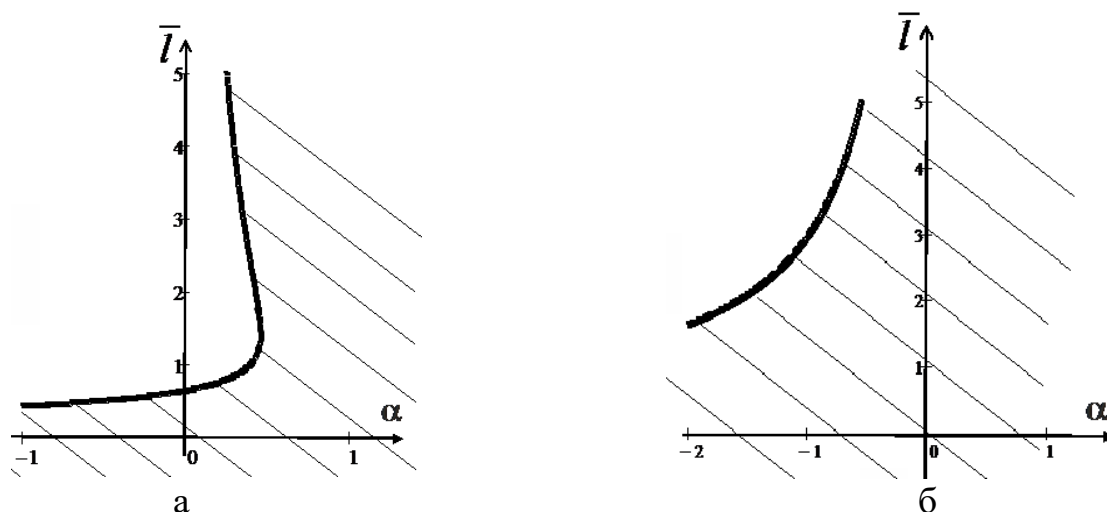


Рисунок 3.14 – Области зміни  $\bar{l}$  і  $\alpha$ , в яких можливе ініціювання старту тріщини коливальним навантаженням,  $K_{cv} = 0,8$ : а –  $\sigma_0 \geq 0$ ; б –  $\sigma_0 < 0$

Якщо амплітуда коливань  $\bar{a} > 0,7$ , тоді критичні довжини тріщин мало відрізняються між собою при різних значеннях змінної величини квазістатичних напружень  $\alpha$  (рис. 3.16).

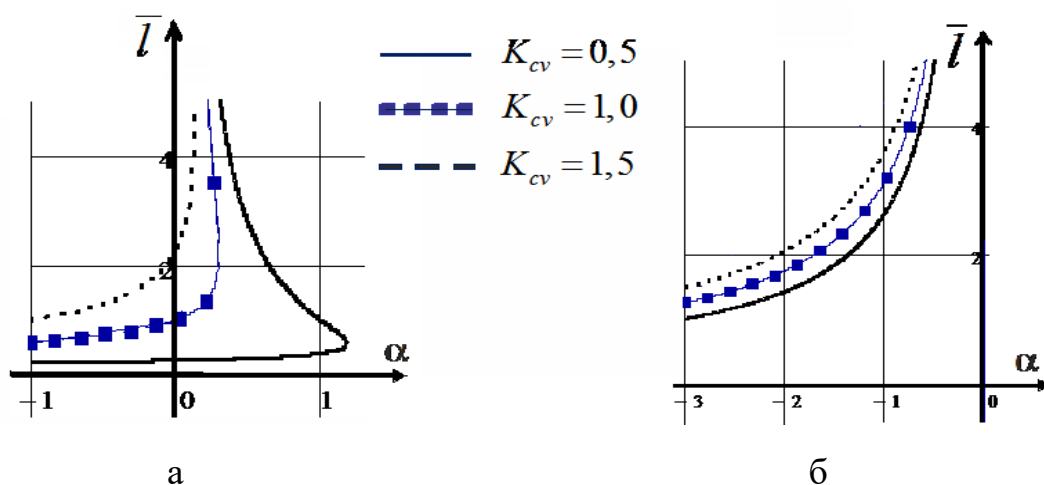


Рисунок 3.15 – Области зміни  $\bar{l}$  і  $\alpha$ , в яких можливе ініціювання старту тріщини коливальним навантаженням при різних значеннях комплексного параметра  $K_{cv}$ : а –  $\sigma_0 \geq 0$ ; б –  $\sigma_0 < 0$

Стрибок довжин тріщин, що стартують, наведено на рисунку 3.16 як частина графіка функції  $\bar{a}(\bar{l})$  ( $\alpha = 0,2$ ), що паралельна осі  $\bar{l}$ . Щоб знайти, при якій амплітуді коливань  $\bar{a}$  відбувається стрибок довжин тріщин, що стартують,



розв'язуємо трансцендентне рівняння  $\frac{d\bar{a}}{d\bar{l}} = 0$  (шукане значення є локальним мінімумом функції  $\bar{a}(\bar{l})$  на проміжку  $(0,1)$ ). Знаходимо корінь  $\bar{l} = 0,611$  цього рівняння на вказаному проміжку. Далі обчислюємо значення функції  $\bar{a}(\bar{l})$  при аргументі  $\bar{l} = 0,611$ , маємо  $\bar{a}(0,611) = 0,695$ .

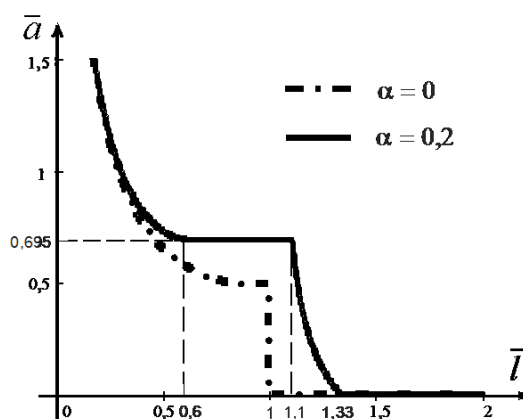


Рисунок 3.16 – Залежності амплітуди коливань  $\bar{a}$  від критичної довжини тріщини  $\bar{l}$  при різних величинах  $\alpha$

Отже, стрибок довжин тріщин, що стартують, при зміні квазістатичних напружень ( $\alpha = 0,2$ ) відбувається, коли приведена амплітуда коливань  $\bar{a} = 0,695$ . Діапазон приведених довжин тріщин, що стартують, є  $(0,611; 1,102)$ . Таким чином, практично у 2 рази збільшується довжина тріщин, що стартують, при певній постійній амплітуді при зміні квазістатичних напружень ( $\alpha = 0,2$ ). Такий ефект при статичному напруженні спостерігається при меншому діапазоні довжин тріщин, що стартують.

На рисунку 3.17 відмічені точки  $A(0,2; 0,611)$  і  $B(0,2; 1,102)$ , що є кінцями відрізка. Координати кожної точки розуміються як приведена довжина тріщини, що стартує, при  $\alpha = 0,2$ . Точки відрізка  $AB$  лежать в області параметрів (заштрихована область вказана на рисунку 3.17), в якій можливий старт тріщини, ініційований коливальним навантаженням,  $K_{cv} = 1, \sigma_0 \geq 0$ .

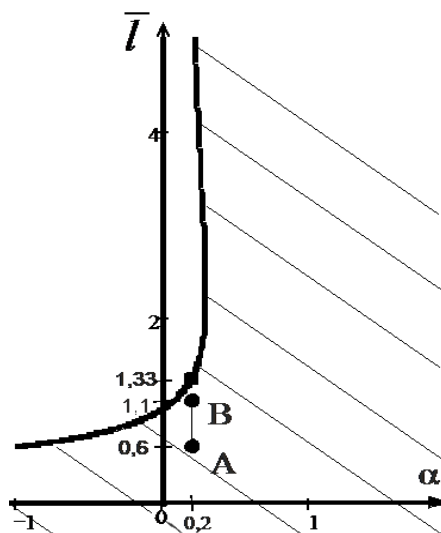


Рисунок 3.17 – Відрізок стрибку довжин тріщин, що стартують, в області (заштрихована), в який можливий старт тріщини, ініційований коливальним навантаженням,  $K_{cv} = 1$ ,  $\sigma_0 \geq 0$

З таблиці 3.1 маємо, що при  $K_{cv} = 1$  вираз  $\frac{8}{27K_{cv}^2} \Big|_{K_{cv}=1} = 0,296$ . Якщо  $\alpha = 0,2$ ,

то при коливальному навантаженні приведені довжини тріщин, що стартують, лежать в інтервалі  $\bar{l} \in (0, \bar{l}_3) \cup (\bar{l}_1, \infty)$ , де  $\bar{l}_1, \bar{l}_3$  знаходимо за формулами (3.35), (3.37). Знаходимо  $\bar{l}_3 = 1,33$ . Таким чином, при наявності коливального навантаження приведені довжини тріщин, що стартують, лежать в інтервалі  $\bar{l} \in (0; 1,33)$ , підтверджує рисунок 3.17, і точка  $(0,2; 1,33)$ , координати якої відмічено на рисунку 3.17, точка лежить на межі поділу двох областей. Інтервал приведених довжин тріщин, що стартують,  $(\bar{l}_1, \infty)$  не розглядаємо, оскільки ці довжини доволі великі  $\bar{l}_1 > 2,2$ .

Застосування отриманих результатів. Перейдемо до розмірних величин (крім безрозмірної величини  $\alpha$ ). Розглянемо вапняк і пісковик (шахта «Гірська»). Квазістаціонарне напруження  $\sigma_0$  отримано за допомогою формули (3.6) при значенні параметра  $K_{cv} = 1$ , що прийнято як критичне (таблиця 3.2). Частота коливань  $\mathcal{G} = 800 \text{ Hz}$  взята з «небезпечної» зони частот. За таку зону приймаємо

діапазон частот 700 – 1400 Hz. Деякі автори приймають, що частоти понад 700 Hz належать до області високих частот [58].

Таблиця 3.2 – Тріщиностійкість  $K_{Ic}$ , швидкість хвиль Релея  $c_R$ , квазістаціонарне напруження  $\sigma_0$  і відповідна область довжини тріщини  $l$ , що стартує, з урахуванням коливального навантаження для вапняку і пісковика

	Пісковик	Вапняк	Джерело
$K_{Ic}$ , МПа $\cdot\sqrt{м}$	0,86	0,35	[66]
$c_R$ , м/с	1954	2073	[66], [67]
$\sigma_0$ , МПа	0,49	0,19	
$l$ , м	(0; 3,25)	(0; 3,45)	

З таблиці 3.2 бачимо, що в вапняку при меншому стаціонарному напруженні  $\sigma_0 = 0,19$  МПа, чим у пісковика, при коливальному навантаженні відбувається старт тріщин приблизно такої ж довжини, що і у пісковика.

Збільшення амплітуди коливань в масиві в 2 рази призводить до зменшення довжин тріщин, що стартують, у 2,5 рази (початкове стаціонарне напруження порід розрізняється) (таблиця 3.3).

При зростанні квазістатичних напружень (величина  $\alpha = 0,2$ ) при однакових амплітудах коливань можуть стартувати тріщини з більшою довжиною  $l_1$  для кожної з порід в порівнянні з ситуацією, коли діє тільки статичне напруження (величина  $\alpha = 0$ ). Але після збільшення амплітуди коливань в 2 рази стартують тріщини з практично однаковою довжиною, що дорівнює 1 м (рис. 3.16).

Амплітуди коливань  $a_1$ ,  $a_2$  відповідають приведеним амплітудам 0,4 і 0,8 відповідно. При зміні квазістатичних напружень зі зростанням амплітуди коливань в 2 рази довжина тріщин, що стартують, зменшується в 3 рази (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Коливальне напруження з амплітудою  $a_i$ , відповідна довжина тріщини  $l_i$ , що стартує, в вапняку й пісковіку при різній зміні квазістатичних напружень  $\alpha$  ( $i = 1, 2$ )

Порода	$a_1$ , МПа	$a_2$ , МПа	$\alpha = 0$		$\alpha = 0,2$	
			$l_1, м$	$l_2, м$	$l_1, м$	$l_2, м$
пісковик	0,2	0,4	2,44	0,98	2,93	0,98
вапняк	0,08	0,16	2,6	1,04	3,11	1,04
примітки	Збільшення амплітуди коливань в 2 рази		Зменшення довжини тріщини в 2,5 рази		Зменшення довжини тріщини в 3 рази	

Нарешті, при приведеній амплітуді  $\bar{a} = 0,695$ , що відповідає  $a = 0,34$  МПа для пісковіку і  $a = 0,13$  МПа для вапняку, починають одночасно стартувати тріщини, довжини яких практично в 2 рази більше. Область довжин тріщин, що стартують,  $1,5 м \leq l \leq 2,7 м$  для пісковіку,  $1,6 м \leq l \leq 2,9 м$  для вапняку при відповідних вказаних амплітудах.

### 3.4 Дослідження умови старту при змінній квазістатичній складовій напруження ( $\alpha \neq 0$ )

Рисунки 3.18, 3.19 ілюструють вплив значення величини  $\alpha$ , що не дорівнює нулю, на залежність  $\bar{a}(\bar{l})$  (3.13). З приведених кривих бачимо, що при зростанні розтягуючого квазістатичного напруження ( $\alpha > 0$  і збільшується) ефект стрибкоподібної зміни критичної довжини тріщини відбувається при значеннях параметра  $K_{cv} < 1$  (рис. 3.18), а зменшення розтягуючого квазістатичного напруження ( $\alpha < 0$  і зменшується) – при значеннях  $K_{cv} > 1$  (рис. 3.19).

Найменше значення критичної довжини тріщини на стрибку можна знайти при розв'язанні рівняння  $\frac{d\bar{a}}{d\bar{l}} = 0$  аналогічно випадку, коли величина  $\alpha = 0$ , достатньо подивитися обчислення похідної  $\frac{d\bar{a}}{d\bar{l}}$  в виразі (3.19) і трансцендентне рівняння (3.20).

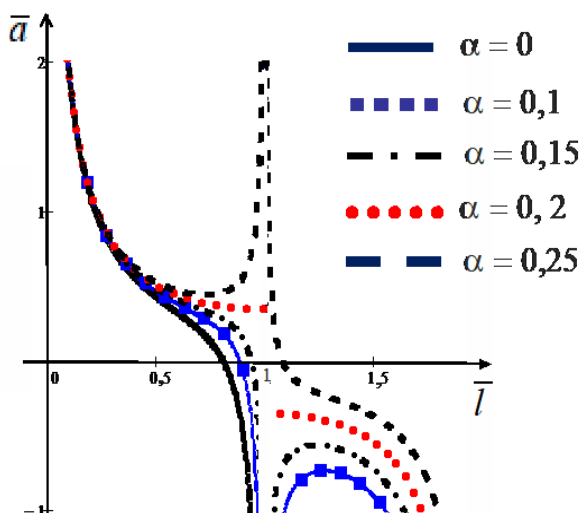


Рисунок 3.18 – Графіки функції  $\bar{a}(\bar{l})$  при значенні  $K_{cv} = 0,9$

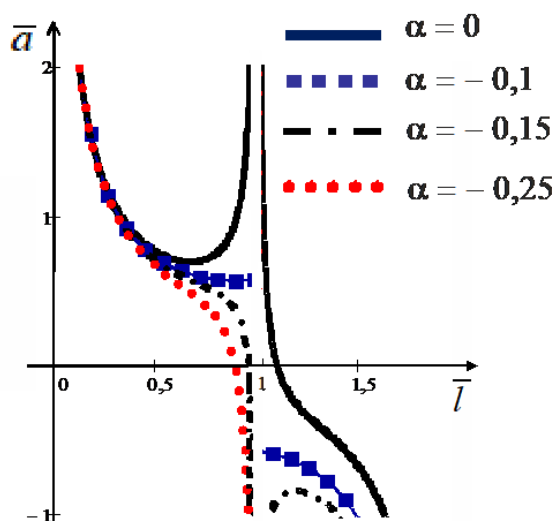


Рисунок 3.19 – Графіки функції  $\bar{a}(\bar{l})$  при значенні  $K_{cv} = 1,05$

В результаті, з огляду на залежність  $\bar{a}(\bar{l})$  в (3.13), приходимо до трансцендентного рівняння щодо приведеної довжини тріщини  $\bar{l}$ :

$$\left(K_{cv} + 2\alpha\bar{l}_-^{3/2} - 2\sqrt{\bar{l}_-}\right)\sin(\pi\bar{l}_-) - 2\pi\bar{l}_-\left(K_{cv} + \frac{\alpha}{2}\bar{l}_-^{3/2} - \sqrt{\bar{l}_-}\right)\cos(\pi\bar{l}_-) = 0.$$

Відповідне значення амплітуди коливань  $\bar{a}_*$  визначається з залежностей (3.13), а найбільше значення критичної довжини тріщини на стрибку  $\bar{l}_+$  обчислюється як абсциса точки перетину прямої  $\bar{a} = \bar{a}_*$  з другою гілкою функції (3.13).

Вигляд залежностей критичної довжини тріщини  $\bar{l}$  від амплітуди  $\bar{a}$  показано на рисунках 3.20 і 3.21. Ці залежності аналогічні до залежностей, що отримані раніше, коли величина  $\alpha = 0$  (рис. 3.2, 3.4, 3.5).

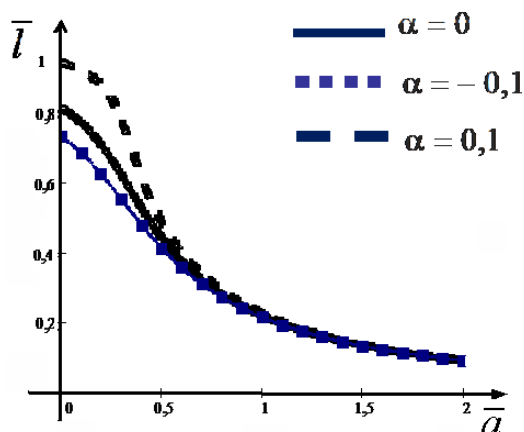


Рисунок 3.20 – Залежність критичної довжини тріщини  $\bar{l}$  від амплітуди  $\bar{a}$  при значеннях  $K_{cv} = 0,9$  і  $\alpha = 0; \alpha = 0,1, \alpha = -0,1$

Вплив величини  $\alpha$  проявляється, перш за все, в зміні значення приведеної амплітуди  $\bar{a}$ , при якому відбувається стрибок критичної довжини тріщини  $\bar{l}$  і в зміні величини самого стрибка.

Рисунок 3.22 ілюструє вказані зміни. Слід зазначити, що приведені значення довжин тріщин на стрибку, як мінімальна, так і максимальна довжини, лежать у встановленій раніше області, де старт без впливу коливань неможливий (розділ 3.3 і рис. 3.15).

У порівнянні зі значенням величини  $\alpha = 0$  стрибок при значеннях величини  $\alpha > 0$  спостерігається при меншому значенні приведеної амплітуди  $\bar{a}$ .

Величина стрибка при цьому помітно зростає, причому це відбувається як через збільшення початкової (максимальної) критичної довжини, так і через зменшення кінцевої (найменшої) критичної довжини тріщини.

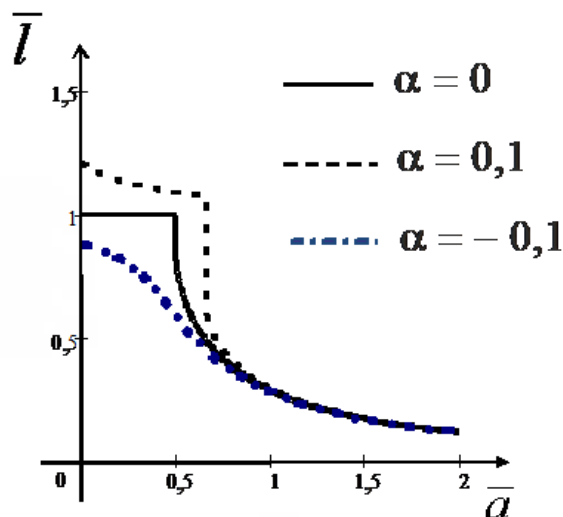


Рисунок 3.21 – Залежність критичної довжини тріщини  $\bar{l}$  від амплітуди  $\bar{a}$  при значеннях  $K_{cv} = 1$  і  $\alpha = 0$ ;  $\alpha = 0,1$ ,  $\alpha = -0,1$

Стійкість системи при цьому, по відношенню до зміни амплітуди коливань, відповідно, падає.

Критичне значення параметра  $K_{cv}$  при цьому змінюється (для позитивних значень величини  $\alpha$  значення параметра  $K_{cv}$  зменшується, а для від'ємних значень величини  $\alpha$  значення параметра  $K_{cv}$  збільшується). Але для реально можливих значень величини  $\alpha$ , що не перевищують 0,2, мало відрізняється від 1.

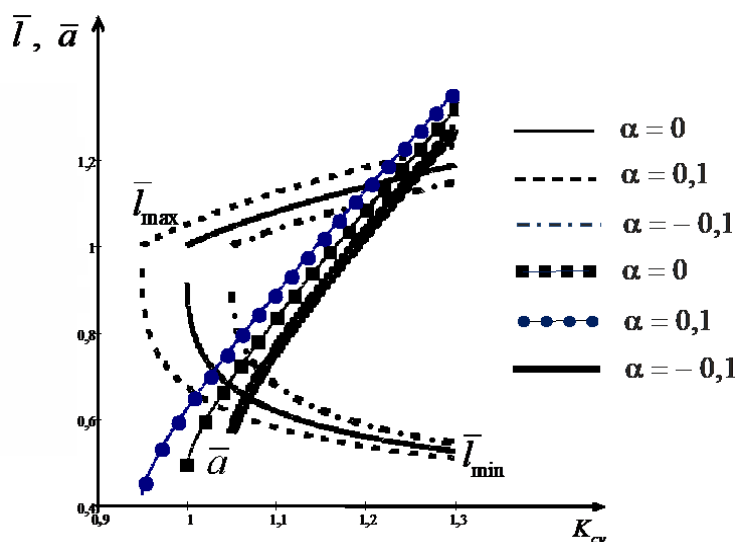


Рисунок 3.22 – Найбільше і найменше значення критичної довжини тріщини  $\bar{l}$  на стрибку і амплітуда  $\bar{a}$  коливання, що ініціює стрибок, залежно від комплексного параметра  $K_{cv}$

### 3.5 Аналіз впливу частоти коливань на можливе зростання тріщин (оцінка критичних значень)

На основі наведених вище результатів значення величини  $K_{cv}$ , що дорівнює 1, було запропоновано розглядати як критичне. Якщо таке значення параметра  $K_{cv}$  має місце, то критична довжина тріщини найбільш чутлива до зміни амплітуди коливань. Причому про таку чутливість можна говорити не тільки при фіксованому значенні амплітуди (амплітуда стрибка), а й на деякому інтервалі зміни амплітуди коливань, починаючи від нуля.

Всі проведені вище дослідження і висновки були зроблені для безрозмірних величин, тому необхідно оцінити дійсні (розмірні) значення параметрів, щоб визначити, чи можуть вони мати місце в реальних процесах гірничого виробництва.

Згідно з формулами (3.6) і (3.9) для переходу до розмірних величин потрібно задатися значеннями в'язкості руйнування ( $K_{1c}$ ) або коефіцієнта тріщиностійкості і швидкістю хвилі Релея. Значення швидкості хвиль Релея обчислювалися за



швидкістю подовжніх хвиль  $C_p$  і коефіцієнта Пуассона  $\nu$ , що визначені експериментально, з використанням апроксимації  $\frac{C_R}{C_s} = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu}$  [66], [67], де

величина  $C_R$  – швидкість хвилі Релея,  $C_s$  – швидкість поперечних хвиль. Тоді

$$C_R = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \cdot \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} C_p.$$

Використовувані параметри є характеристиками відповідних гірських порід і, взагалі, однозначно не визначені в силу, перш за все, природної мінливості порід. Тому значення, наведені в таблиці 3.4, слід розглядати як деякі оцінки відповідних величин.

Таблиця 3.4 – Значення характеристик в'язкості руйнування  $K_{1c}$ , швидкості подовжніх хвиль  $C_p$ , коефіцієнта Пуассона  $\nu$ , швидкості хвиль Релея  $C_R$

Гірська порода	$K_{1c}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$C_p, \text{м/с}$	$\nu$	$C_R, \text{м/с}$	Джерело
Пісковик	0,36-1,42 (1,4*)	0,8-4,5 (3,5*)	0,1-0,3 (0,2*)	1954	[41], [66], [67]
Вапняк	0,36-1,24 (1,2*)	1,0-5,5 (4*)	0,27	2073	[41], [66], [67]
Алевроліт	0,53	0,8-4,0 (3,2*)	0,17-0,25 (0,2*)	1786	[41], [66], [67]
Кам'яне вугілля	0,27	0,8-2,5 (1,7*)	0,1	1012	[41], [66], [67]

\* – значення, що прийняті при розрахунках

Як приклад розглянемо пісковик та кам'яне вугілля, оскільки такі породи найбільш суттєво відрізняються за своїми властивостями.

Залежності початкового  $l_0$  і кінцевого  $l_N$  значень критичної довжини тріщини на стрибку, відповідної частоти коливань  $\mathcal{G}$  і амплітуди розраховано за формулами:

$$l(K_{cv}; \bar{l}; K_{1c}; \sigma_0) = \frac{\pi K_{1c}^2 \bar{l}}{4\sigma_0^2 K_{cv}^2}, \quad l_0(\sigma_0) = l(1; 1; K_{1c}; \sigma_0), \quad l_N(\sigma_0) = l(1; 0,65; K_{1c}; \sigma_0),$$

$$\mathcal{G}_N(K_{cv}; C_R; K_{1c}; \sigma_0) = \frac{4C_R \sigma_0^2 K_{cv}^2}{\pi K_{1c}^2}, \quad \mathcal{G}(\sigma_0) = \mathcal{G}_N(1; C_R; K_{1c}; \sigma_0) \text{ і показано на рисунках}$$

3.23 і 3.24. Як аргумент тут виступає постійна складова напруження. Амплітуда коливань становить при цьому  $0,5\sigma_0$  (рис. 3.23, 3.24).

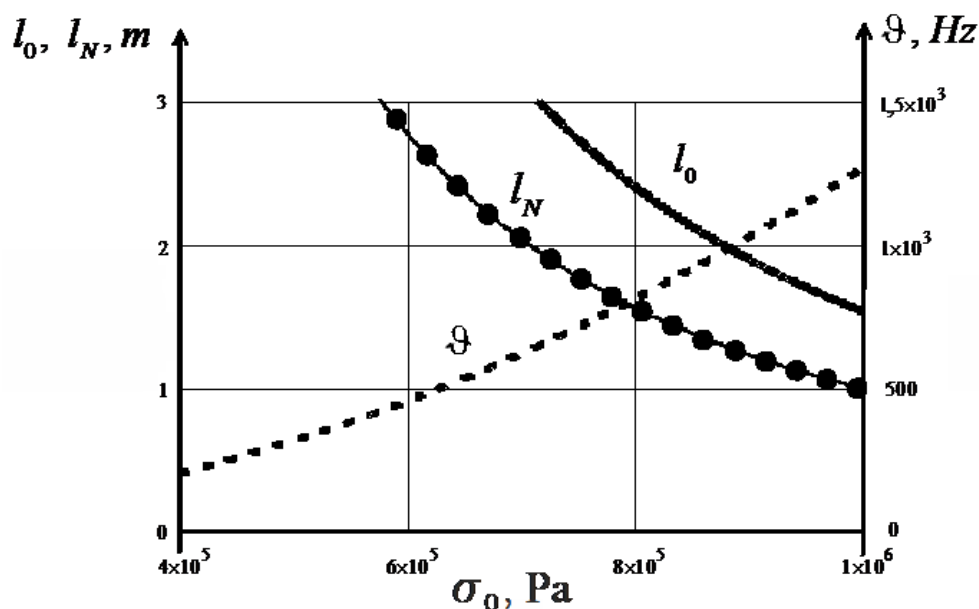


Рисунок 3.23 – Початкова і кінцева довжини  $l_0$ ,  $l_N$  тріщин, що стартують, на стрибку та відповідні частоти  $\mathcal{G}$  залежно від постійної складової напруження  $\sigma_0$  (пісковик)

З наведених графіків випливає, що, наприклад, для кам'яного вугілля при початковому тиску всього 0,2 МПа коливання на частоті 800 Нз з амплітудою 0,1 МПа можуть призвести до стрибкоподібної зміни критичної довжини тріщини з 1,5 до 1,0 м. Іншими словами, якщо амплітуда коливань в якийсь момент підвищилася до зазначеного рівня, то всі тріщини довжиною від 1 до 1,5 м

можуть почати зростати. У випадку пісковика аналогічне явище спостерігається при більшій величині початкового тиску, але у всіх випадках значення розмірних величин цілком реальні.

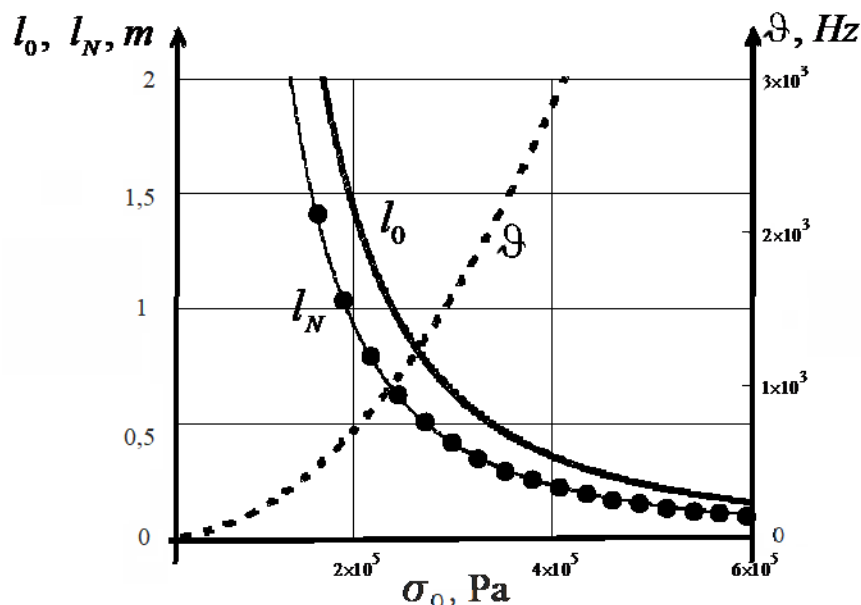


Рисунок 3.24 – Початкова і кінцева довжини  $l_0$ ,  $l_N$  тріщин, що стартують, на стрибку та відповідні частоти  $f$  залежно від постійної складової напруження  $\sigma_0$  (кам'яне вугілля)

Експериментально встановлено [57] і нормативно визнано [8], що дворазове збільшення амплітуди коливань, що реєструються в інтервалі 700 – 1400 Hz, є індикатором можливого динамічного прояву гірського тиску. Тому доцільно досліджувати як змінюються довжини тріщин, що стартують, при дворазовому збільшенні амплітуди коливань і які особливості змін, що відбуваються саме в цьому інтервалі частот. Результати таких розрахунків наведено на рисунках 3.25 і 3.26. В обох випадках  $K_{cv} = 1$ , а безрозмірна початкова амплітуда  $\bar{a} = 0,35$ .

Аналіз наведених графіків дозволяє в такий спосіб інтерпретувати небезпеку збільшення амплітуди коливань в зазначеному інтервалі частот. Розглянемо на рисунках 3.25, 3.26 інтервал, в якому частота нижче 1000 Hz. Значення можливих критичних довжин тріщин в цьому інтервалі зменшуються, але є досить великими для тріщин, що стартують, (для пісковика це значення становить близько 1,3 м,

для вугілля – близько 1,1 м). Загалом, в цьому інтервалі частот значення довжин тріщин, що стартують, змінюються для пісковіку від 1,3 до 2,5 м, для кам'яного вугілля – від 1,1 до 1,5 м.

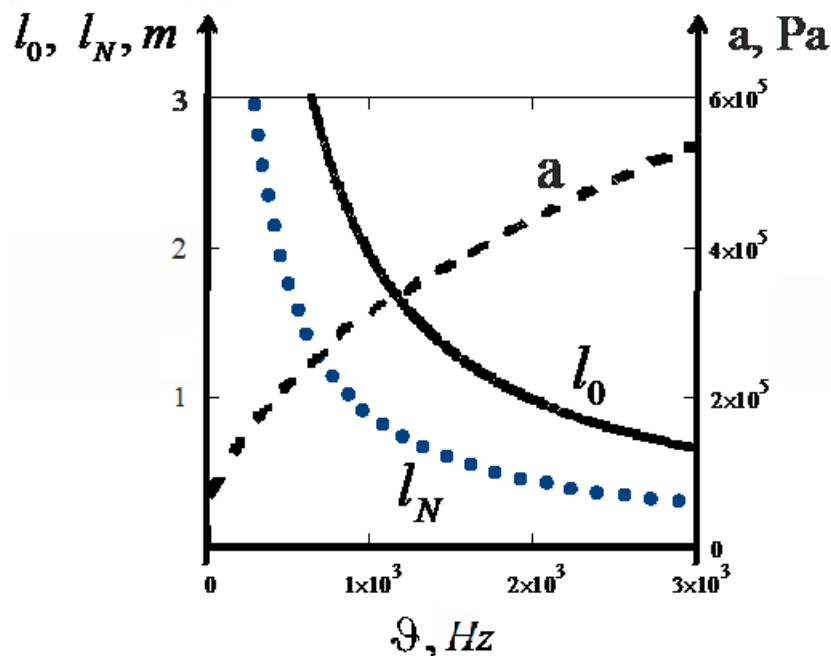


Рисунок 3.25 – Початкова і кінцева довжини тріщин при збільшенні амплітуди коливань в 2 рази і відповідна амплітуда залежно від частоти (пісковік)

Кількість тріщин такої довжини небагато і ймовірність попадання їх в область з необхідною амплітудою коливань надзвичайно мала. Коли значення частот більше  $2000 \text{ Hz}$ , відмінність між початковою і кінцевою довжинами тріщин помітно менше, тому ефект можливого розвитку тріщин також істотно менше. Крім того, для забезпечення умов старту потрібна наявність значно більшої амплітуди коливань. При значеннях частот, близьких до  $1000 \text{ Hz}$ , відмінність між початковою і кінцевою довжинами тріщин більше, чим ця ж відмінність при значеннях частот, більших  $2000 \text{ Hz}$ .

Таким чином, значення частот в районі  $1000 \text{ Hz}$  в рамках викладених уявлень є компромісом між описаними ситуаціями. При цьому інтервал зміни значень критичної довжини тріщини досить великий (понад 1 м для пісковіку і приблизно 0,5 м для вугілля), найменша критична довжина тріщини для пісковіку – 0,7 м,

для вугілля – 0,45 м і початкове напруження цілком реальні (0,3 МПа – для пісковика, 0,07 МПа – для вугілля). Отримуємо, що при частоті приблизно 1000 Hz зміни значень критичних довжин тріщин значні.

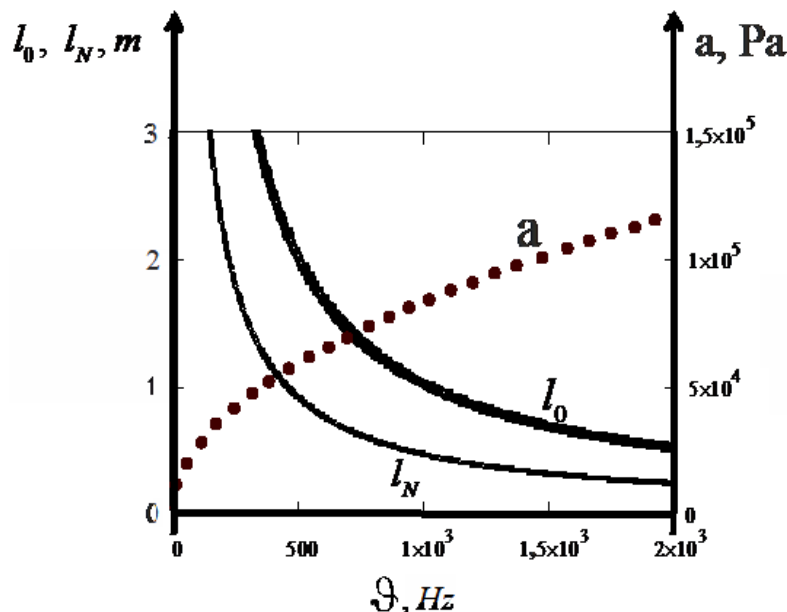


Рисунок 3.26 – Початкова і кінцева довжини тріщин при збільшенні амплітуди коливань в 2 рази і відповідна амплітуда залежно від частоти (кам'яне вугілля)

Проведемо також аналітичні розрахунки, що підтверджують той факт, що пружні коливання в діапазоні частот 700 – 1400 Hz є «небезпечними», оскільки можуть викликати динамічні прояви гірського тиску. Розрахунки проведені для таких гірських порід: вапняк, алевроліт (аргіліт), кам'яне вугілля. Значення приведених довжин тріщин  $\bar{l}$  отримані при розв'язанні трансцендентного рівняння  $\bar{a} \cdot \sin c(\pi \bar{l}) - \left( \frac{K_{CV}}{\sqrt{\bar{l}}} - 1 \right) = 0$ .

Параметр тріщиностійкості  $K_{CV}$  гірської породи і частота коливань  $g$  визначалися з рівності  $K_{CV} = \frac{K_{1c}}{2|\sigma_0|} \cdot \sqrt{\frac{\pi g}{C_R}}$ .

Результати були отримані для початкового розтягуючого напруження  $\sigma_0 = 0,9$  МПа, приведена амплітуда  $\bar{a}$  змінюється з 0,4 до 0,8.

Для вапняку збільшення амплітуди коливань в 2 рази веде до зменшення довжин тріщин, що стартують, в 2 – 2,6 рази. Цей ефект спостерігається в діапазоні частот 890 – 1400  $Hz$ .

Для алевроліту (аргіліту) збільшення амплітуди в 2 рази веде до старту тріщин в 2,3 рази меншої довжини в діапазоні частот 2000 – 3000  $Hz$ . При діючому напруженні розтягу  $\sigma_0 = 0,9$  МПа для даної породи діапазон частот 900 – 1200  $Hz$  можна вважати «безпечним» з точки зору стрибка критичних довжин тріщини.

Для кам'яного вугілля збільшення амплітуди в 2 рази веде до старту тріщин в 1,67 разів меншої довжини в діапазоні частот 600 – 3600  $Hz$ . Але ситуація докорінно змінюється при початковому розтягуючому напруженні  $\sigma_0 = 0,25$  МПа. Збільшення амплітуди в 2 рази веде до старту тріщин в 2 – 4 рази меншої довжини. Причому важливо зазначити: при частоті коливань  $\vartheta = 1340$   $Hz$  існує величина приведеної амплітуди коливань  $\bar{a} = 0,8$ , до досягнення якої критична довжина тріщини практично не змінюється при зростанні амплітуди, а після досягнення різко падає, зменшуючись в 4 рази. Таким чином, для кам'яного вугілля вважаємо «небезпечним» діапазон частот 700 – 1400  $Hz$  з точки зору стрибка критичних довжин тріщини при початковому розтягальному напруженні  $\sigma_0 = 0,25$  МПа.

Зауважимо, що аналогічно у випадку алевроліту (аргіліту) при деякому розтягальному напруженні  $\sigma_0$ , що менше розглянутого  $\sigma_0 = 0,9$  МПа, діапазон «небезпечним» частот буде 900 – 1200  $Hz$  з точки зору стрибка критичних довжин тріщини.

Отже, аналітичні розрахунки і графічні дослідження підтверджують факт, що збільшення амплітуди коливань в 2 рази в діапазоні частот 700 – 1400  $Hz$  веде до значного зменшення довжин тріщин, що стартують, в гірських породах.

## **РОЗДІЛ 4 ДЖЕРЕЛА ХВИЛЬОВОГО РУХУ У ПОРОДНОМУ МАСИВІ. РЕЄСТРАЦІЯ, ОБРОБКА І АНАЛІЗ СКЛАДОВИХ АКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ, ЩО ВІДПОВІДАЛЬНІ ЗА ІНІЦІУВАННЯ РОЗВИТКУ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ**

У попередньому розділі показано, що діючі в околі виробок коливання певного частотного інтервалу можуть ініціювати розвиток газодинамічних явищ. Даний розділ присвячено дослідженню джерел коливань в гірських породах, особливостей їх поширення, реєстрації й частотного аналізу з метою виявлення небезпечних, в зазначеному сенсі, складових.

### **4.1 Утворення й поширення акустичних коливань в вуглепородному масиві**

Механічні коливання в гірських породах мають хвильову природу. Хвильовий рух, тобто зміна деякої сукупності фізичних величин, що переміщається в просторі, виникає в результаті динамічного збурення середовища. У багатьох випадках, зокрема для акустичних хвиль, величина змін деформацій мала, і середовище в першому наближенні можна вважати пружним, а хвилі, відповідно, пружними хвилями.

Розглянемо джерела механічних хвильових процесів, що спостерігаються в околі виробок. Як внутрішні джерела можуть виступати процеси, що обумовлені структурними змінами самого середовища, в якому поширюються збурення. Наприклад, процеси, що пов'язані з утворенням і розвитком тріщин, дислокацій, розривів, зсувів, деформаційних неоднорідностей і якісних структурних перетворень. Залежно від масштабів такі зміни проявляються у вигляді землетрусів, мікросейсмів, гірських ударів, акустичної емісії. Великомасштабні сейсмічні явища генерують хвилі з частотами не вище  $50 \text{ Hz}$ , тобто лежать поза визначеного нами частотного діапазону. Для прогнозування гірських ударів

проводяться акустичні спостереження. З позицій моніторингу стану вуглепородного масиву серед внутрішніх джерел інтерес представляють хвилі акустичної емісії [68].

Як зазначалося в розділі 1, вуглепородний масив неоднорідний за своєю структурою (наявність дислокацій, мікро- і макродефектів), як і будь-яка гірська порода. При тепловому або електромагнітному впливі, механічному навантаженні на гірські породи відбувається накопичення зародкових мікротріщин, розмір яких залежить від структури порід, а швидкість накопичення – від умов навантаження або впливу. Коли концентрація зародкових тріщин досягне критичної величини, йде процес взаємодії мікротріщин, що супроводжується злиттям і укрупненням мікротріщин в макротріщини, що є розривами суцільності в гірських породах. Процес утворення тріщин і процес подальшого розвитку тріщин призводить до дисипації механічної енергії, що виділяється у вигляді акустичного, теплового та електромагнітного випромінювань.

Таким чином, тріщина, що розвивається, супроводжується акустичним випромінюванням (найчастіше у вигляді пружного імпульсу). Характеристики акустичного випромінювання залежать від природи розриву суцільності середовища та динаміки його розвитку, від лінійних розмірів тріщини і умов на її берегах. Реальний розвиток тріщин відбувається переривчасто, у вигляді окремих одиничних стрибкоподібних збільшень довжин тріщин. Саме такий нестаціонарний розвиток тріщини виникає в результаті дискретної взаємодії поля динамічних напружень у вершині тріщини з полем статичних напружень в гірській породі. При виконанні умови  $\sigma_i \geq \sigma_{кр}$  або  $W_i \geq W_{кр}$ , де  $\sigma_i$ ,  $W_i$  – поточні значення концентрації напружень та енергії формозміни у вершині тріщини,  $\sigma_{кр}$ ,  $W_{кр}$  – відповідні критичні значення вищезазначених величин, відбувається стрибкоподібне збільшення довжини тріщини на всі боки. При цьому кожен окремий стрибок довжини тріщини характеризується своєю тривалістю і швидкістю розвитку. Причому швидкість росту тріщини є величиною обмеженою



(при відсутності додаткового надходження енергії ззовні безпосередньо у вершину тріщини).

З ростом швидкості розвитку тріщини збільшується щільність потоку енергії навколо вершини тріщини. При малій швидкості дана щільність потоку енергії локалізується, що підтверджує той факт, що більша частина енергії потрібна, щоб розкрити тріщину. При зростанні темпів розкриття тріщини область, до якої підводиться енергія, розширюється, середня щільність енергії на одиницю приросту тріщини падає і виникає розворот векторів енергії [68]. В результаті змінюється сумарна щільність енергії у різних напрямках від вершини тріщини щодо різних швидкостей її зростання. Наприклад, при великих швидкостях (коли вони досягають значення швидкості поширення релеєвської хвилі, що дорівнює  $0,9 \cdot c_s$ , де  $c_s$  – швидкість поширення поперечних хвиль) спрямованість максимуму щільності енергії відповідає куту  $60^\circ$  [68]. У цей момент можлива поява нових тріщин, що відгалужуються від вершини початкової (старої) тріщини, цей факт помітно знижує швидкість росту старої тріщини.

При утворенні тріщини виникає пружний імпульс, який характеризується параметрами: амплітудою, енергією, тривалістю, формою імпульсу і його частотним спектром (розділ 1). Дані параметри дають уявлення про масштаб події та інтенсивності утворення тріщин. Якщо швидкість росту тріщин мала, то випромінювання від тріщин має незначну амплітуду. Зміна характеру й темпу тріщиноутворення призводять до змін спектральної щільності акустичного сигналу і визначають форму імпульсу. Якщо швидкість росту тріщин збільшується, то у спектрі випромінювання з'являються більш високочастотні складові. Частотний спектр обумовлений формою імпульсу. Пружний імпульс, поширюючись у породі, набуває вигляду затухаючого сигналу.

Акустичну емісію (АЕ) можна вважати нестационарним випадковим процесом (параметри цього процесу є функції часу). Легко реєстрованим і важливим параметром акустичної емісії є кількість імпульсів. Розгляд хвильових процесів у вуглепородному масиві вимагає введення деяких модельних уявлень.

Як правило, моделі, що приймаються, досить грубо описують реальні властивості й процеси, що обумовлено складністю та комплексним характером останніх [68].

У вуглепородному масиві містяться різні геологічні включення, що значно відрізняються за фізичними властивостями від вмісних порід. Процес накопичення опадів, що відбувається під дією гравітаційного поля Землі, не носить постійний характер, що призводить до шаруватості товщ осадових порід. Дія нерівномірного поля напружень сприяє утворенню у них зон стиснення і розтягування, що веде до виникнення загальної порушеності, тріщинуватості, сланцюватості масиву. Дія ґрунтових вод найчастіше у низці специфічних умов супроводжується утворенням обводнених зон і певних порожнеч. В результаті людської діяльності з'являються порожнечі, тріщини у масиві, відбувається перерозподіл зон напруженого стану.

Отже, при поширенні пружних хвиль у середовищі з неоднорідностями виникають явища дифракції та розсіювання. У цьому процесі можна простежити виникнення додаткових збурень, що взаємодіють з полем падаючої хвилі, які сприяють прояву різних ефектів. Закони цих ефектів значно відрізняються від класичних законів геометричної оптики. Наприклад, згідно з уявленнями геометричній оптики, область простору близько неоднорідності розбивається на дві різко розмежовані зони: світла й тіні. У зоні світла спостерігаються падаюча й відбита від поверхні об'єкта хвилі. У зоні тіні таких хвиль не існує, оскільки об'єкт перешкоджає їх проникненню у цю зону. Однак у масиві на неоднорідності в зоні тіні у результаті дифракції хвиль спостерігається складне за структурою хвильове поле, що, з одного боку, погіршує умови, що дозволяють визначити наявність неоднорідності у масиві, з іншого боку, несе додаткову інформацію про цю неоднорідність.

З огляду на всю складність властивостей і процесів, тим не менше, основні використовувані поняття базуються на моделі суцільного ідеального лінійно-пружного середовища. Основні рівняння, що описують рух такого середовища: рівняння руху (другий закон Ньютона, записаний для деякого об'єму суцільного середовища, визначає зв'язок між тензором напруження і вектором переміщення),

рівняння нерозривності (визначає зв'язок між тензором деформації і вектором переміщення) і закон пружності (визначає залежність між тензорами напруження і деформації). Дана система може бути зведена до одного векторного рівняння щодо переміщення  $\bar{u}$  (рівняння руху Ламе) [Седов Л.І., 1976]. Доведено [73], що будь-який хвильовий процес в кінцевому або нескінченному твердому пружному тілі може бути описаний як суперпозиція двох принципово різних хвильових рухів. Перший з них називається безвихровим ( $rot(\bar{u})=0$ ), відповідні хвилі називають безвихровими хвилями, хвилями всебічного стиснення-розширення або поздовжніми хвилями. Другий хвильовий рух називають еквіволюмінальним ( $div(\bar{u})=0$ ), а відповідні хвилі – еквіволюмінальними хвилями, хвилями зсуву або поперечними хвилями. Хвилі зсуву можуть бути поляризовані в будь-якому напрямку. Для обох типів хвиль застосовується також найменування – «об'ємні». Фізично наявність двох типів хвиль в твердому тілі (на відміну від газу й рідини) обумовлена зсувною пружністю. Оскільки швидкість безвихрових хвиль вище, то для неї використовують позначення  $c_p$  (*p*-primary), а для швидкості хвиль зсуву –  $c_s$  (*s*-secondary). Значення швидкостей можна оцінити за формулами

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}; \quad c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad \text{де} \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad \lambda, \mu - \text{ константи}$$

Ламе;  $E, \nu$  – модуль Юнга й коефіцієнт Пуассона;  $\rho$  – щільність.

Якщо пружне тіло не обмежується, то два типи хвиль поширюються незалежно одна від одної (як би, не помічаючи одна одну). Наявність меж призводить до взаємодії хвиль (в силу необхідності задоволення умовам на межі) і появи хвиль, що поширюються з відмінними від  $c_p$  та  $c_s$  швидкостями. Оскільки вуглепородний масив має шарувату структуру, а в виробках, звичайно, існують і вільні поверхні, то процеси, пов'язані з відбиттям хвиль, набувають особливого значення в формуванні хвильового поля в околі виробок.

На межі поділу двох середовищ при падінні на неї хвилі (виключаючи випадок нормальної хвилі і зсувної горизонтально поляризованої хвилі) можна спостерігати явище трансформації. Це явище полягає в перетворенні при

відображенні – заломленні хвиль одного типу в хвилі іншого типу, наприклад, поздовжніх в поперечні й навпаки.

Наявність межі поділу може призвести до зміни напрямку поширення хвилі, до передачі хвильового збурення з одного середовища в інше та до зміни фізичної природи хвильового руху після відображення-заломлення. Характер зазначених процесів визначається граничними умовами, тобто специфікою передачі збурень на межі поділу [68].

Інтерференційні процеси можуть призводити до формування особливих видів хвиль, що коротко розглянемо нижче. Зауважимо, що дані види хвильових рухів (крім бічної хвилі) визначені на підставі рішення в повному обсязі сформульованих крайових задач, тобто коли спосіб генерації вихідної гармонійної хвилі не розглядається, але умови на межах виконуються чітко [68].

Хвилі Релея. Поверхневі хвилі. Поширюються уздовж вільної поверхні твердого тіла і локалізовані поблизу межі. Траєкторії руху частинок, через які проходить хвиля Релея, мають вигляд еліпсів, що лежать в сагітальній площині (площина утворена нормаллю до хвильового фронту й нормаллю до поверхні). Амплітуди коливань зменшуються по глибині за експоненціальним законом. Практично вся енергія, що переноситься хвилями, зосереджена в поверхневому шарі товщиною, що дорівнює довжині хвилі. Можуть розглядатися як суперпозиція двох плоских хвиль: неоднорідної поздовжньої хвилі і неоднорідної поперечної хвилі з вертикальною поляризацією. Фазова швидкість хвилі  $c_R$  не залежить від частоти (відсутня дисперсія) і приблизно може бути обчислена за формулою  $c_R = 0,9c_s$ , де  $c_s$  – швидкість поширення поперечних хвиль.

Хвилі Лява. Поширюються уздовж твердого півпростору, що покритий твердим шаром з меншою швидкістю поширення коливань (швидкість звуку в шарі менше швидкості звуку в півпросторі). Поверхнева хвиля горизонтальної поляризації. Являє собою сукупність нормальних хвиль (що відповідають різним кореням дисперсійного рівняння), кожна з яких має свій закон розподілу напружень та зміщень як у шарі, так і в півпросторі. У напівпросторі напруження і зміщення зменшуються з глибиною за експоненціальним законом. Дисперсійні

хвилі (фазова швидкість залежить від частоти коливань). Швидкості нормальних мод лежать в інтервалі  $(c_{S0}, c_{Sh})$ , де  $c_{S0}, c_{Sh}$  – швидкості поперечних об'ємних хвиль в півпросторі й в шарі відповідно. У разі, коли товщина шару дорівнює нулю, хвилю, що утворюється, тобто поверхневу хвилю горизонтальної поляризації, також називають хвилею Лява.

Хвилі Стоунлі. Поверхневі хвилі. Поширюються вздовж межі двох твердих жорстко зчеплених (склеєних) напівпросторів. Дисперсія відсутня, але область постійних матеріалів контактуючих тіл, при яких можливе існування хвиль надзвичайно вузька (дисперсійне рівняння не завжди має розв'язок). Швидкість хвиль лежить в інтервалі  $(\max(c_{R1}, c_{R2}), \min(c_{S1}, c_{S2}))$ , де  $c_{S1}, c_{S2}$  – швидкості поперечних хвиль,  $c_{R1}, c_{R2}$  – швидкості хвиль Релея в контактуючих середовищах. При відношенні щільностей контактуючих середовищ, що прагне до нуля (або до нескінченності), переходить в хвилю Релея.

Хвилі Релея-Лемба. Поширюються вздовж твердого шару з вільними межами, якщо товщина шару порівняна з довжиною хвилі або більше. Являють собою комбінації біжучих уздовж шару і стоячих поперечних хвиль. Дисперсійні хвилі – швидкість поширення залежить від довжини хвилі й товщини шару, різні моди мають різні швидкості. В пластині товщиною  $h$  при частоті  $f$  можуть поширюватися кінцеве число симетричних і антисиметричних мод, причому тим більше, чим більше величина  $\frac{fh}{c_s}$ . Для кожної моди існує критичне значення.

Мода поширюється, якщо для неї відношення  $\frac{fh}{c_s}$  перевищує деяке критичне значення. В іншому випадку (при докритичних частотах і товщині) відповідний рух швидко згасає. У більшості випадків найбільш важливе значення має перша мода, що поширюється, і її критичне значення.

Каналові хвилі. Поширюються вздовж шару (хвилеводу) зі зниженою в порівнянні з навколишнім середовищем швидкістю звуку. Нормальні дисперсійні хвилі. Швидкість поширення зі збільшенням частоти прагне до швидкості

об'ємної поперечної хвилі в хвилеводі, а зі зменшенням частоти до швидкості об'ємної поперечної хвилі в навколишньому середовищі. Існує дискретний набір мод, що поширюються, зі своїми критичними частотами. Хвиля Релея-Лемба може розглядатися як окремий випадок каналової хвилі.

Бокова (головна) хвиля. Якщо випромінювач розташований на деякій відстані від межі поділу двох середовищ, в середовищі з меншою швидкістю звуку, то крім звичайної прямої і відбитих хвиль формується, так звана бокова хвиля. При точковому випромінювачі й плоскій границі хвиля має конічний фронт, що тягнеться від площини поділу (тут він збігається з фронтом заломленої хвилі в високошвидкісному середовищі) до торкання з фронтом відбитої хвилі, що виходить із кола на межі поділу і відповідає куту повного внутрішнього відображення. Уздовж заданого напрямку амплітуда хвилі зменшується обернено пропорційно квадрату відстані. У разі імпульсного випромінювання бокова хвиля приходить першою в точку спостереження (випереджаючи пряму і відбиту хвилі).

Практично всі наведені моделі хвильових рухів можуть бути використані для опису процесів, що протікають в околі виробок. Хвилі Релея завжди формуються при силовому впливі на забій. Хвилі Лява можуть формуватися в силу наявності зон віджиму. Хвилі Стоунлі можуть утворюватися на межах породних шарів з близькими значеннями швидкостей зсувних хвиль. Оскільки швидкість звуку у вмісних породах значно вище ніж у вугіллі, пласти вугілля утворюють природні хвилеводи, то каналові і бічні хвилі набувають особливо важливе значення.

Пріоритет при виборі тієї або іншої моделі залежить від конкретних властивостей середовища, розташування, орієнтації і характеристик випромінювача і реєстратора. У той же час всі описані види хвильових процесів є, в даному разі, ідеалізацією. Тому важливо знати, які саме з інтерференційних хвиль найбільшою мірою впливають на акустичні коливання в області їх реєстрації. При цьому слід аналізувати характеристики сигналів як в часовій, так і, що особливо важливо з огляду на результати розділу 3, в частотній області.

Як зазначалося, джерелом коливань в породному масиві (зондуючий сигнал) є не інструменти, що працюють, а результат їх взаємодії з масивом, тобто процес руйнування (тріщиноутворення і розвитку тріщин) вугілля та вмісних порід [57].

Дослідження в розділі 3 показали, що пружні коливання в масиві слід контролювати, і визначати поряд з амплітудами коливань і діапазон частот (стежимо за частотами понад  $700 \text{ Hz}$ ) цих коливань. Особливо в момент змін амплітуд, оскільки аналіз впливу частот коливань на можливе зростання тріщин при зростанні амплітуди коливань показав «небезпечний» діапазон частот ( $700\text{--}1400 \text{ Hz}$ ). Таким чином, саме збільшення амплітуди коливань в зоні частот  $700\text{--}1400 \text{ Hz}$  супроводжується можливим розвитком тріщин в породі.

Крім того, важливо встановити, чи можуть коливання з встановленими «небезпечними» частотами виникати в породному масиві при роботі зазвичай використовуваних в шахтних умовах машин і агрегатів. З зазначеними цілями були проведені сейсмоакустичні дослідження в шахтних умовах.

#### **4.2 Апаратура, місце й порядок проведення сейсмоакустичних досліджень**

Загальна схема реєстрації коливань в породному масиві полягає в наступному. Геофон, що виконує функцію електромеханічного перетворювача, встановлюється в попередньо пробурений в породі шпур. При коливаннях породи геофон генерує електричний сигнал. По лінії зв'язку електричний сигнал передається на поверхню, де обробляється, аналізується і реєструється спеціальною апаратурою. При цьому, як правило, використовується персональний комп'ютер. Таким чином, необхідними частинами вимірювальної системи є: геофон, лінія зв'язку, наземне обладнання та (можливо) програмне забезпечення для ПК.

При проведенні досліджень використовувалися сейсмоакустична апаратура АК-1м [50], [58], застосування якої передбачено «Правилами ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ» [8]. Структурна схема наземного блоку апаратури показана на рис. 4.1. Використовується геофон з

п'єзоелектричним перетворювачем. Зв'язок геофону з наземною частиною обладнання здійснюється по штатній лінії зв'язку («відкрита пара») загальношахтної системи «АГЗ» (Автоматичний газовий захист) або всередині шахтного зв'язку. Вихідний сигнал, що подається на лінійний вхід звукової карти персонального комп'ютера (ПК) і є обмеженою величиною 2 V. Частота зрізу фільтра низьких частот – 4 kHz. Максимальний коефіцієнт посилення сигналу 60 Db [50], [58].

Реєстрація та первинний аналіз сигналів проводився за допомогою спеціально розробленої програми в середовищі MatLab. Частота дискретизації – 41,1 kHz, довжина машинного слова – 16 bit.

Подальша детальна обробка і аналіз записаних сигналів проводилися з використанням аудіоредактора Adobe Audition та системи комп'ютерної алгебри MathCAD.

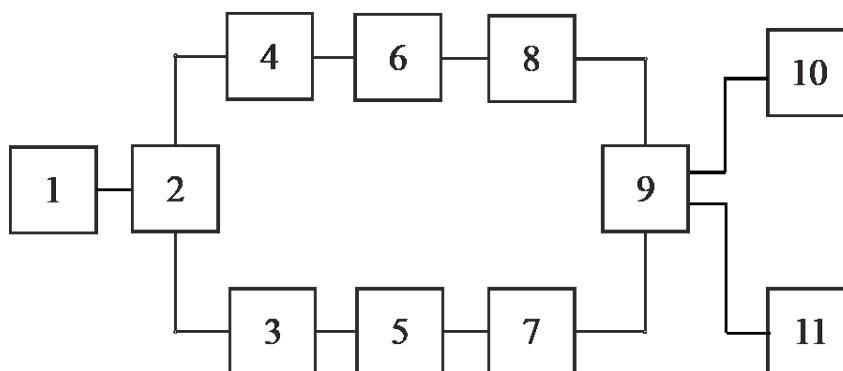


Рисунок 4.1 – Структурна схема наземного блока апаратури АК-1:

1 – вхідний підсилювач з автоматичним регулюванням підсилення (АРП); 2 – режекторний фільтр; 3, 4 – фільтри верхніх і низьких частот; 5,6 – підсилювачі; 7,8 – детектори; 9 – аналоговий ділильний пристрій; 10 – пороговий пристрій з генератором звукової сигналізації; 11 – ПК

Дослідження проводилися в умовах лави №1086 шахти «Дніпровська» [69]. Лава №1086 підготовлена до похилої частини західного крила шахтного поля горизонту 265 м. Вугільний пласт  $C_8^{10}$  марки ДГен. Лава №1086 має доцільне відпрацювання балансових запасів в межах 4 підсічних фігур: 5С1, 10С1 поля шахти «Дніпровська», 81В, 74В поля шахти «Західно-Донбаська». Вугільний



пласт  $C_6^{10}$  простої будови, геологічна потужність коливається в межах 0,90 – 1,12 м. Вугілля чорне, кам'яне, межа міцності при стисненні 25,2 – 43,4 МПа, тріщинувате, тріщини частково виконані кальцитом і щітками дрібнокристалічного піриту. Питома тріщинуватість досягає 15 – 25 тр./п. м. Піритизація локалізована у верхній частині пласта й в приконтантній зоні в породах безпосередньої покрівлі. Фізико-механічні властивості порід на досліджуваній ділянці, за даними ІГТМ (м. Дніпро), мають значення, наведені в таблиці 4.1. Вугільний пласт є обводненим, виділення води з пласта відбувається у вигляді слабкого просочування з тріщин кліважу по контакту, що є розшарованим, з підстилаючими породами [69].

Таблиця 4.1 Фізико-механічні властивості порід на досліджуваній ділянці

Порода	$c_p \cdot 10^3, \frac{M}{c}$	$c_s \cdot 10^3, \frac{M}{c}$	$\rho \cdot 10^3, \frac{kg}{m^3}$
Алевроліт	3,8	2,0	2,5
Аргіліт	3,2	1,7	2,3
Пісковик	4,2	2,2	2,65
Вугілля (марка Ж)	2,1	1,1	1,3

Пласт характеризується хвилястим заляганням як за падінням, так і за простяганням. Падіння пласта в межах виїмкового стовпа змінюється від північно-західного до північного напрямку під кутом 1 – 6°. Вмісні породи наведені таким чином:

а) в безпосередній покрівлі пласта алевроліт – горизонтальний шаруватий за рахунок прошарків піщаного матеріалу, межа міцності на стиск 14,0 – 33,2 МПа, нестійкий У зв'язку з його низькими характеристиками міцності і слабким між шаровим зчепленням алевроліт на потужність до 0,10 м може руйнуватися слідом за виїмковим механізмом. Аргіліт – горизонтальний шаруватий за рахунок

прошарків піщаного матеріалу, межа міцності на стиск 20,6 – 21,5 МПа, нестійкий [69, додатки Б1, Б2];

б) основна покрівля в нижній частині – потужним шаром пісковика, а вище розміщено шари аргіліту, алевроліту і малопотужний шар пісковика. Аргіліти і алевроліти шаруваті, легко обвалюються (категорія по стійкості А1), пісковики середньої обвальності (категорія по стійкості А2);

в) в безпосередньої підшві пласта залягає алевроліт і аргіліт, по контакту з пластом грудкуватої текстури зі зниженими характеристиками міцності, нестійкі, схильні до інтенсивного здимання і розмокання в воді з втратою несучої здатності, алевроліт міцністю 11,5 – 18,2 МПа, аргіліт міцністю 11,0 – 26,0 МПа [69, додатки Б1, Б2].

Були виконані два види сейсмоакустичних досліджень. Перший вид досліджень проводився з метою визначення наявності або відсутності коливань «небезпечної частоти» при роботі різних породоруйнівних механізмів.

При другому виді сейсмоакустичних досліджень оцінювався вплив різних типів хвиль на характеристики реєстрованих сигналів.

### **4.3 Оцінка спектрів акустичних сигналів, що генеруються породоруйнуючими механізмами**

Для характеристики частотного складу вимірюваного сигналу використовуємо спектральний аналіз. Перетворення Фур'є є математичною основою, що пов'язує деяку модель сигналу з його поданням до частотній області. Як правило, сигнал має шумовий або випадковий характер, тому методи статистики мають важливе значення в спектральному аналізі. Якби основні статистичні характеристики сигналу були відомі чітко, або ж їх можна було б визначити без похибок на кінцевому інтервалі цього сигналу, то спектральний аналіз був би точним методом обробки сигналів. Але в дійсності по єдиному відрізьку сигналу можна отримати лише певну оцінку його спектра [33].

Слід зазначити, що від параметрів перетворення аналогового сигналу (безпосередньо знімається з датчика) в цифрову форму залежить якість цифрової

обробки сигналу. До таких параметрів належать частота дискретизації і розрядність. Для коректного оцифрування сигналу за теоремою Котельнікова потрібно, щоб частота дискретизації була не менше, ніж в 2 рази більшою максимального значення частоти спектра перетвореного аналогового сигналу [34], [35]. Особливе значення в разі нестационарних сигналів, сигналів, що містять шумові компоненти, випадкових сигналів, має довжина отриманого після дискретизації часового ряду [36].

Спектри періодичних функцій. Нехай функція  $f(t)$  з періодом  $T = 2l$  розкладається в ряд Фур'є, тоді:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t), \quad (4.1)$$

де  $a_k = \frac{1}{l} \cdot \int_{-l}^l f(t) \cos \omega_k t \cdot dt$ ,  $b_k = \frac{1}{l} \cdot \int_{-l}^l f(t) \sin \omega_k t \cdot dt$ , частота  $\omega_k = k \cdot \frac{\pi}{l} = k \cdot \omega_1$ ,

$k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$  тут і далі в цьому пункті,  $\omega_1 = \frac{\pi}{l}$  – основна частота.

У комплексній формі ряд (4.1) можна записати у вигляді:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} c_k e^{i \cdot \omega_k t}, \quad (4.2)$$

де  $c_k = \frac{1}{2} \cdot (a_k - i \cdot b_k)$ . Як відомо, спектр амплітуд представляє собою набір чисел

$A_k = |c_k| = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ . Наглядне уявлення амплітудного спектра у вигляді

діаграми: в кожній точці  $\omega_k = k \cdot \omega_1$  по осі абсцис на відновленому перпендикулярі відкладаємо довжини  $A_k$ . Спектр фаз функції  $f(t)$  – сукупність

$\varphi_k = -\arg c_k = \arctg \left( \frac{b_k}{a_k} \right)$ . Відповідно побудова спектра фаз – діаграма  $\varphi(\omega)$ .

Довжини  $\varphi_k$  відкладаються на перпендикулярах в точках  $\omega_k = k \cdot \omega_1$  по осі частот  $\omega$ .

Подібні діаграми для періодичної функції  $f(t)$  характеризують структуру її ряду Фур'є, виділяючи найвагомші частоти, що представлені в розкладанні

гармоніками з найбільшими амплітудами. Гармонійні спектри є функціями дискретного аргументу  $\omega_k = k \cdot \omega_1$  [37].

Спектри неперіодичних функцій. Для неперіодичної функції  $f(t)$  з областю визначення  $(-\infty, +\infty)$  на будь-якому кінцевому проміжку  $[-l, l]$  допускається розкладання в ряд Фур'є (4.1). Тоді згідно з теоремою Фур'є, функція  $f(t)$  подана в вигляді інтеграла Фур'є:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} c(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (4.3)$$

де  $c(\omega) = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} f(\theta) e^{-i\omega\theta} d\theta$  – спектральна щільність функції  $f(t)$  [37]. Тоді

амплітудний спектр або просто спектр функції  $A = A(\omega) = |c(\omega)|$ , спектр фаз  $\varphi = \varphi(\omega) = -\arg c(\omega)$ . Тут  $\omega$  – частота, що безперервно змінюється.

На відміну від спектра періодичних функцій в будь-якій фіксованій частоті в розкладанні (4.3) ніяка відмінна від нуля амплітуда не відповідає. Має сенс лише амплітуда, що відноситься до інтервалу частоти (але не до точки) [37].

### 4.3.1 Спектральна оцінка сигналів, що виявлені у вуглепородному масиві

Звукові файли були отримані на шахтах «Дніпровська» в 2012 році в умовах, описаних в розділі 4.2, та «Степова». Джерело коливань – породоруйнівний механізм.

Геофон встановлювався у вугільному пласті в попередньо пробурений шпур діаметром 42 мм і глибиною 1 – 1,5 м в безпосередній близькості (від 10 м до 40 м) від діючих породоруйнуючих механізмів.

Реєстровані сигнали розглядаються як стаціонарний випадковий процес. На рисунку 4.2 наведено амплітудні спектри сигналу, джерелом якого є шум працюючого обладнання «буріння по породі». Діаграма рисунку 4.2а містить флуктуації, що особливо простежуються на проміжку  $0 < \vartheta < 500$  в порівнянні з діаграмою на рисунку 4.2б. При осередненні амплітудного спектра

використовуваної записи даних по всім блокам діаграма змінюється (рис. 4.2б).  
Спектри отримані в результаті обробки сигналу, тривалість якого 4,359 с.

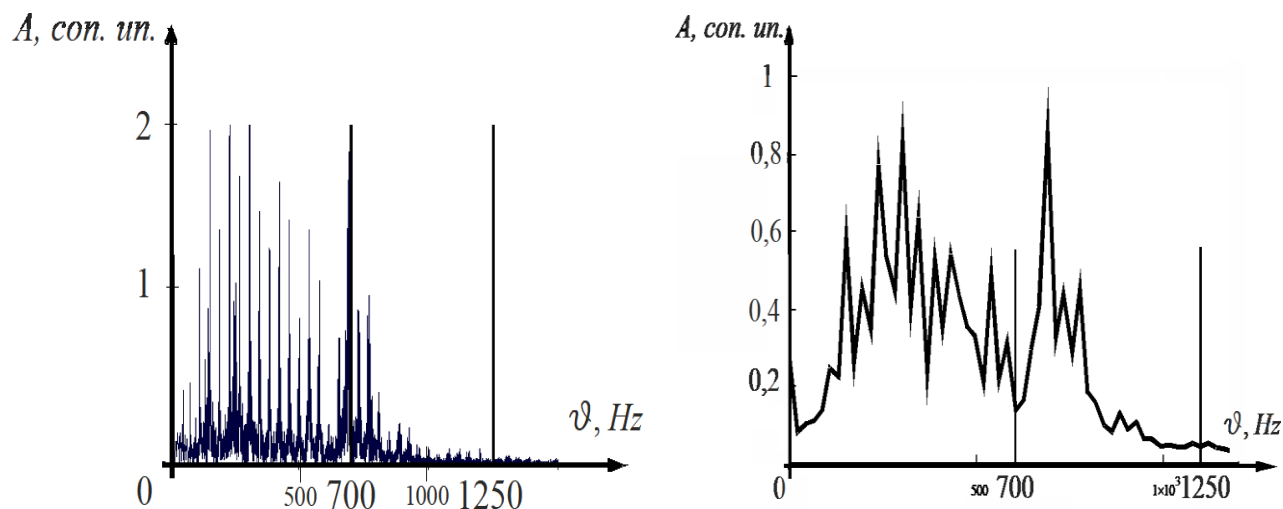


Рисунок 4.2 – Спектр сигналу «буріння по породі»:

а – спектр, що побудовано безпосередньо; б – спектр, що побудовано при осередненні амплітудного спектра по всіх ділянках в межах діапазону частот

$$0 - 1,5 \cdot 10^3 \text{ Hz}$$

На рисунку 4.3 наведено амплітудний спектр сигналу, джерелом якого є шум працюючого комбайна (сигнал «робота комбайна»). Тривалість сигналу становить 7,38 с.

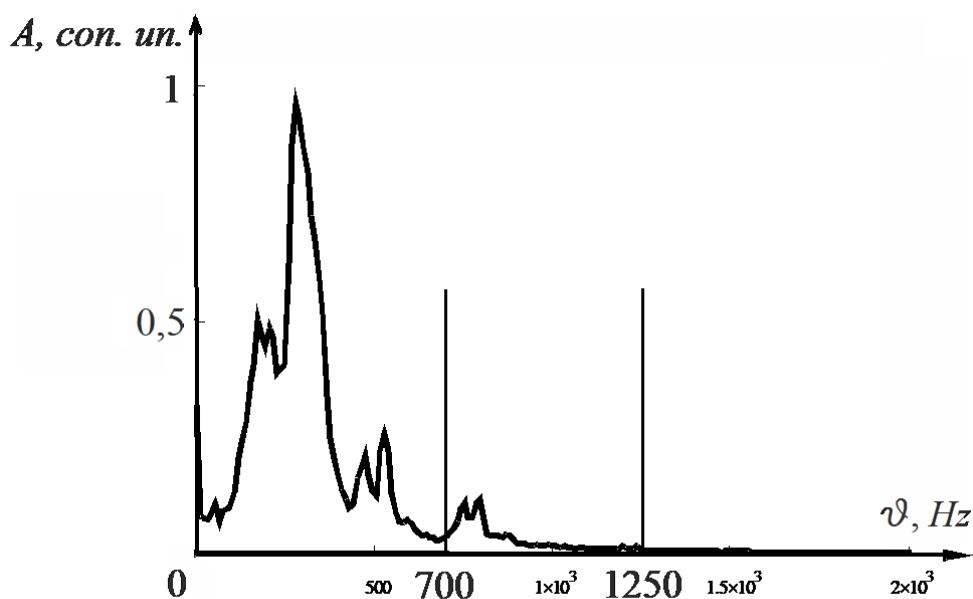


Рисунок 4.3 – Спектр сигналу «робота комбайна»

На рисунку 4.4 наведено амплітудний спектр сигналу, джерелом якого є шум працюючого відбійного молотка (сигнал «робота відбійного молотка»). Тривалість розглянутого сигналу становить 4,74 с.

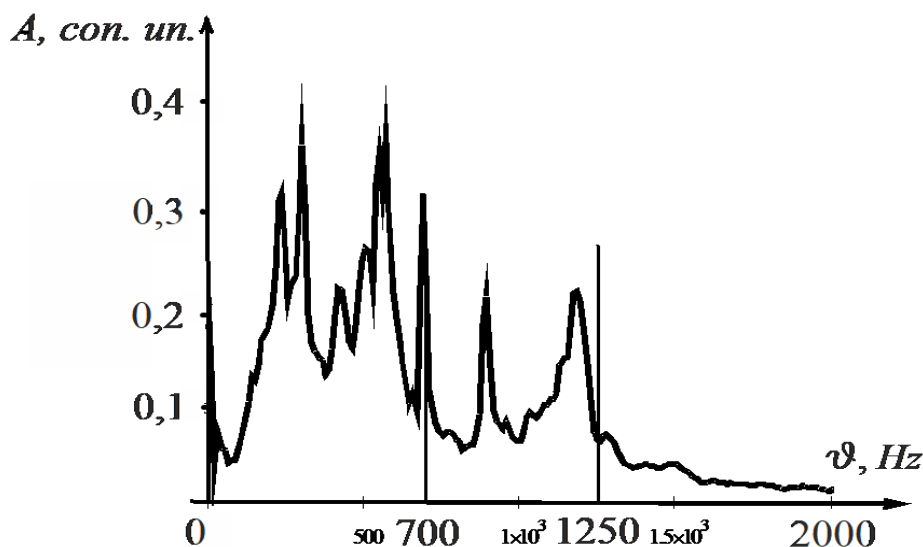


Рисунок 4.4 – Спектр сигналу «робота відбійного молотка»

На рисунку 4.5 наведено оцінювання амплітудного спектра сигналу, джерелом якого є шум працюючої стругової установки (сигнал «робота стругової установки»). Тривалість сигналу становить 6,002 с.

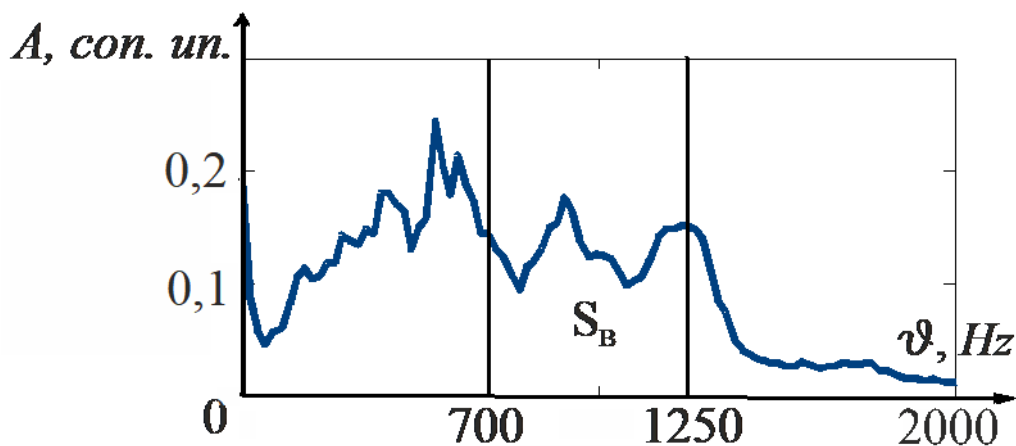


Рисунок 4.5 – Спектр сигналу «робота стругової установки»

Відтворювалися і аналізувалися сигнали в програмі-аудіоредакторі Adobe Audition 3.0. Доступ до WAV-файлів, наступна обробка сигналів (векторів даних) і їх спектральна оцінка здійснювалася в математичному пакеті MathCAD. Кожен з оброблених сигналів одноканальний, частота відліків кожного сигналу  $SamplRate=4,41 \cdot 10^4$  відліків/с, роздільна здатність 16 біт в одному відліку, середній потік  $8,82 \cdot 10^4$  байт/с (вбудована функція доступу до файлу GETWAVINFO(file) дає ці характеристики звукового сигналу).

Зупинимося на отриманні спектральних оцінок сигналів, що наведено на рисунках 4.2 – 4.5. Обчислюємо кількість відліків  $Nn$  по горизонтальній осі на даному часовому проміжку  $[t_0, t_N]$ , використовуючи частоту  $SamplRate$  вибірки. Порядок величини  $Nn$  в кожному випадку становить  $10^5$ . На кожному з вже 100 розглянутих ділянок (блоках) визначаємо амплітуду спектра  $A_i(\nu)$ ,  $i = \overline{0,99}$ , за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). В результаті обчислюємо середнє 100 значень амплітуд спектра по кожній зі 100 ділянок (блоків)  $A(\nu) = \frac{1}{100} \sum_{i=0}^{99} A_i(\nu)$ . Таким чином, діаграми на рисунках 4.2 – 4.5 осереднені по всіх ділянках в межах всього діапазону частот.

Розглянуті вище спектри отримано при реєстрації коливань гірської породи, що викликані істотно різними породоруйнівними механізмами. Фактично в усіх випадках зареєстровано коливання в інтервалі частот  $700 - 1400$  Hz, що визначено як небезпечний. Тобто встановлено, що різні породоруйнівні механізми здатні створювати коливання з такою частотою в породному масиві.

Разом з тим слід зауважити, як показано в розділі 3, що небезпеку становлять не самі коливання з зазначеними частотами, а істотне зростання їх амплітуди на цих частотах.

#### **4.4 Дослідження впливу різних інтерференційних хвиль на характеристики коливань, що реєструються, в вугільному пласті**

Дослідження проводилися по підготовлених шпурах на пікетах 19, 22, 25, 34, 44 лави № 1086 шахти «Дніпровська». Акустичний сигнал штучно створювався на кожному пікеті з одного боку виїмкового стовпа, а приймався геофоном з іншого боку на однойменному пікеті (рис. 4.6).

Для проведення вимірювань на одному пікеті було потрібно три шпури. Два розташовувалися співвісно по різні боки лави. Один (з боку збірного штреку) використовувався для установки геофону №1, а другий (з боку бортового штреку) для закладки заряду ВР. Третій шпур призначений для установки геофону №2 (необхідний для реєстрації моменту вибуху ВР) і розташовувався на відстані приблизно 3 м від устя шпура для ВР у вентиляційному штреку.

Всі шпури бурять горизонтально у вугільному пласті коронками діаметром 41 мм. Глибина перших двох шпурів (співвісних) приблизно 1,5 м, глибина третього (для геофону №2) 0,5 м.

Потужність масиву (ширина виїмкового стовпа) 287 м. Відповідно найкоротша відстань між джерелом (ВР) і приймачем коливань (геофон №1) складає  $L = 284$  м. Відстань від джерела коливань до реєстратора моменту вибуху (геофон №2) була приблизно рівною  $l = 3,16$  м.

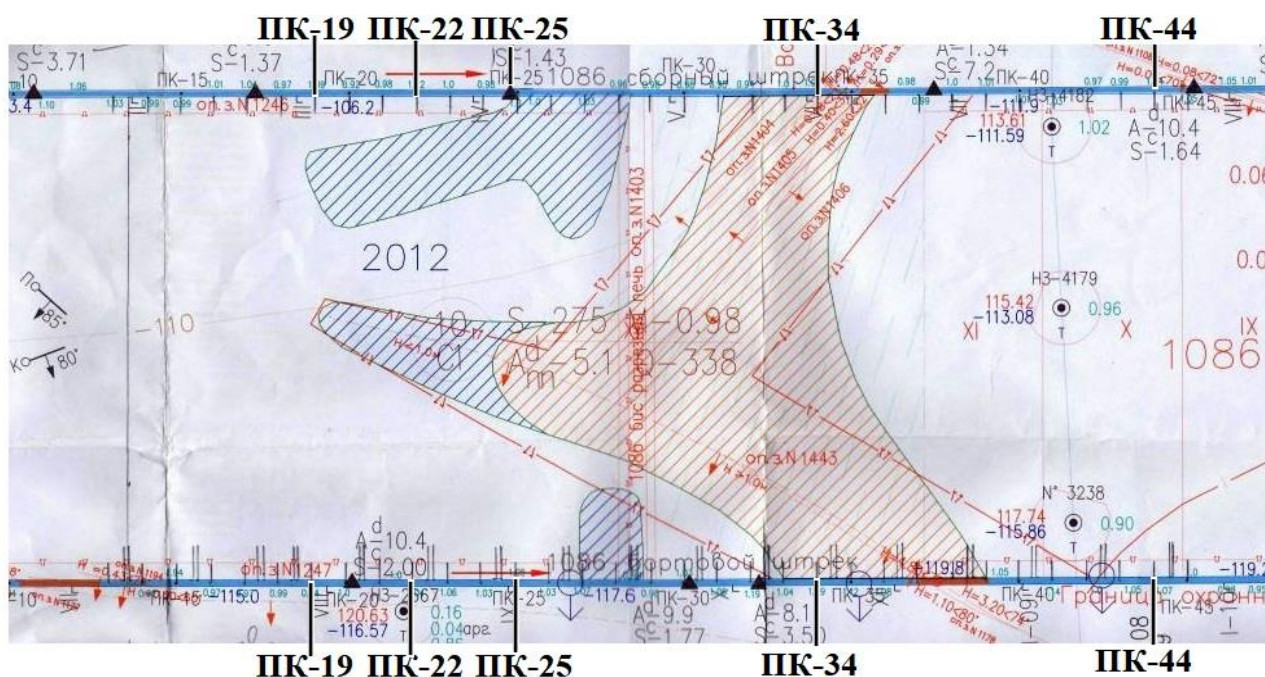




Рисунок 4.6 – Схема лави № 1086 шахти «Дніпровська» з зазначенням пікетів, на яких були проведені дослідження

Як ВР використовувався амоніт-Т19, маса заряду 200 гр. Вибух ВР ініціював хвильової імпульс, геофон №2 фіксував момент виходу збурення в породне середовище, а геофон №1 реєстрував коливання  $a(t)$ , викликані хвилями, що пройшли через всю довжину вугільного стовпа. Реєстрований сигнал істотно нестационарний, імпульсний. На рисунках 4.7 – 4.11 наведено сигнали, зареєстровані обома датчиками на кожному пікеті.

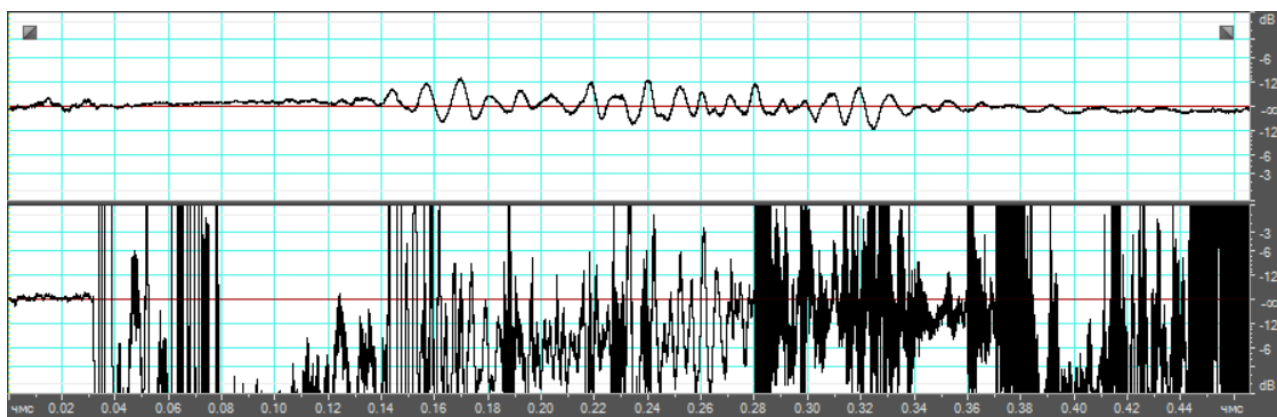


Рисунок 4.7 – Сигнали, зареєстровані на пікеті 19

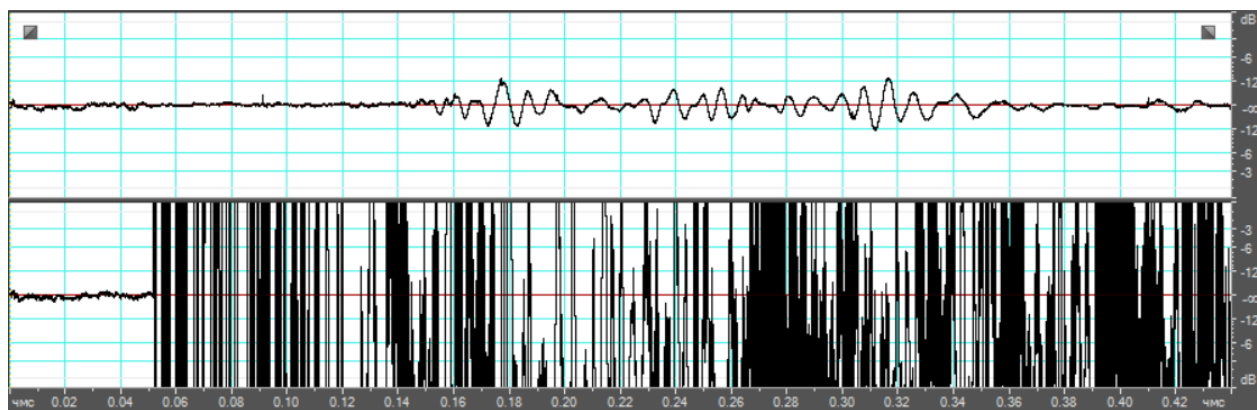


Рисунок 4.8 – Сигнали, зареєстровані на пікеті 22

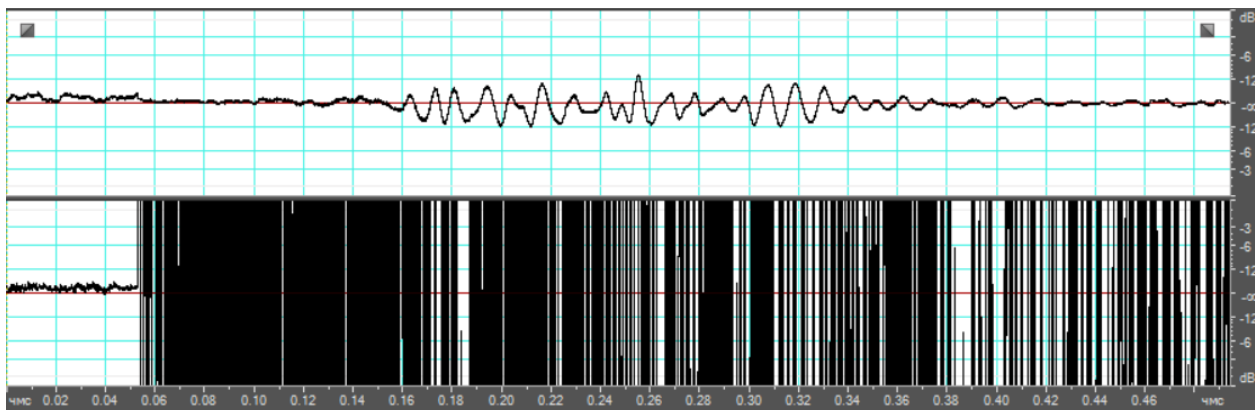


Рисунок 4.9 – Сигнали, зареєстровані на пікеті 25

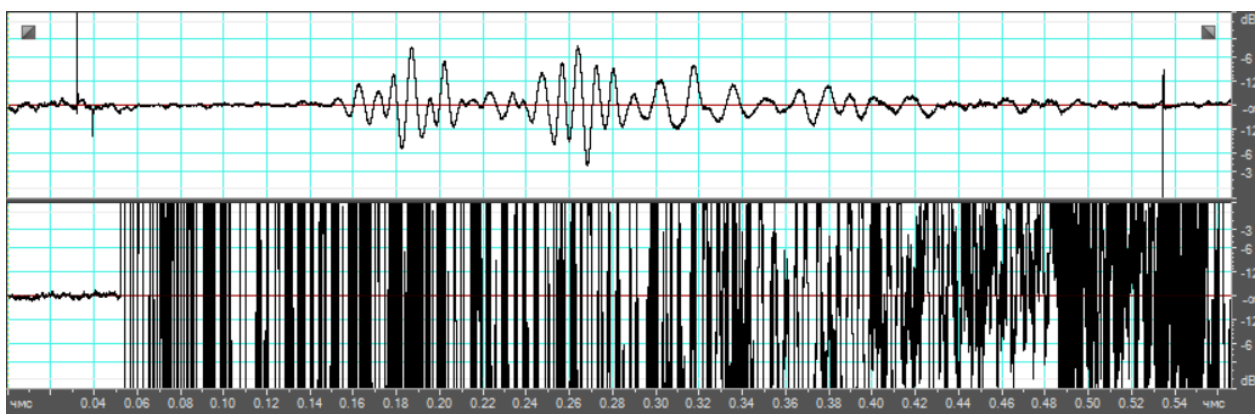


Рисунок 4.10 – Сигнали, зареєстровані на пікеті 34

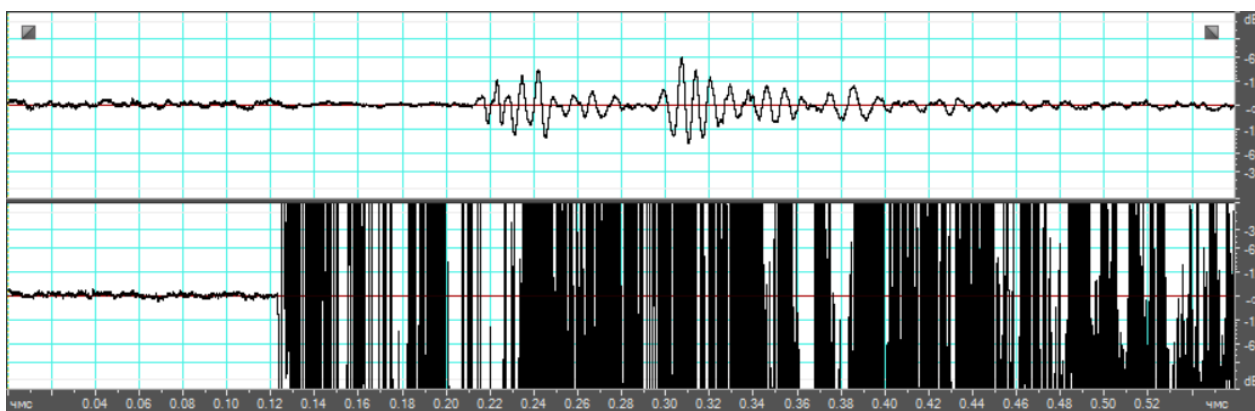


Рисунок 4.11 – Сигнали, зареєстровані на пікеті 44

Різниця між часом приходу сигналів на геофони у всіх випадках (для всіх пікетів) виявилася приблизно рівною  $t_0 = 90$  мс, відхилення по пікетах не більше 2 мс. Враховуючи, що до геофона №2 першими приходять поздовжні збурення зі швидкістю  $c_{py} = 2100 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  (швидкість поздовжніх звукових хвиль у вугіллі), при

цьому пройшовши відстань від місця розташування заряду ВР приблизно  $l = 3,16$  м, неважко оцінити швидкість збурень, що першими досягли датчика, котрий розташований на протилежному боці вугільного стовпа:

$$V = \frac{L}{t_0 + \frac{l}{c_{py}}} = \frac{284 \text{ м}}{0,09 \text{ с} + \frac{3,16 \text{ м}}{2100 \frac{\text{м}}{\text{с}}}} = 3104 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Отримане значення значно перевершує швидкість поздовжніх хвиль у вугіллі і явно свідчить про те, що першими на вимірювальний геофон приходять бічні хвилі, що поширюються по межі з вмісними породами. Слід зауважити, що траєкторія поширення збурень при цьому не є прямою лінією і, крім того, частину свого шляху (на початковій ділянці і в зоні реєструючого геофону) вони проходять по вугіллю, тому знайдене значення  $V = 3104 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  трохи нижче швидкості поздовжніх хвиль у вмісних породах (таблиця 4.1).

Видається важливим відокремити частину сигналу, що асоціюють з бічними хвилями, оскільки характеристики саме цієї частини сигналу визначаються насамперед станом контактної поверхні вугілля-порода. На рисунку 4.12 показано сейсмограми для всіх п'яти пікетів від моменту вступу (лінійний тренд вилучено). Там же вертикальними лініями відзначено моменти часу можливого приходу збурень:

$$\begin{aligned} t_{\Pi y} &= \frac{L}{c_{py}} - t_0 = \frac{284 \text{ м}}{2100 \frac{\text{м}}{\text{с}}} - 0,09 \text{ с} = 45 \text{ мс}, \\ t_{=\bar{o}} &= \frac{L}{c_{s\bar{o}}} - t_0 = \frac{284 \text{ м}}{2000 \frac{\text{м}}{\text{с}}} - 0,09 \text{ с} = 52 \text{ мс}, \\ t_{=y} &= \frac{L}{c_{sy}} - t_0 = \frac{284 \text{ м}}{1100 \frac{\text{м}}{\text{с}}} - 0,09 \text{ с} = 168 \text{ мс}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

якби їх час пробігу визначался прямою поздовжньою хвилею у вугіллі, поперечною хвилею у вмісній породі, і поперечною прямою хвилею у вугіллі відповідно. При обчисленнях в (4.4) взяті дані: швидкість прямої поздовжньої хвилі у вугіллі  $c_{py} = 2100 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ , швидкість поперечної хвилі у вмісній породі,  $c_{s\bar{o}} = 2000 \frac{\text{М}}{\text{с}}$ , швидкість поперечної прямої хвилі у вугіллі  $c_{sy} = 1100 \frac{\text{М}}{\text{с}}$  (таблиця 4.1). Очевидно, що дані оцінки моментів часу слід вважати заниженими.

У зареєстрованих сигналах можна виділити кілька ділянок (хвильових пакетів). При цьому логічно порівнювати часи приходу пакетів в точку реєстрації з обчисленими оцінками моментів часу, що зазначені в (4.4). На всіх сейсмограмах є досить великий проміжок часу (на рис. 4.12 від  $t=0$  до  $t=t_{\Pi_y}$ ), котрий сформований тільки бічними поздовжніми хвилями і, отже, характеристики цієї ділянки сейсмограм повинні визначатися станом контакту між вугіллям і вмісними породами, а також станом вмісних порід в безпосередній близькості від вугільного пласта. Хоча значення часів  $t_{\Pi_y}$  та  $t_{\bar{o}}$  є близькими, слід врахувати, що поздовжні хвилі в вугіллі багаторазово відбиваються від меж шару як поздовжніми, так і поперечними хвилями. В результаті формуються так звані каналові хвилі. Це дисперсійні хвилі. Наслідком дисперсії є сильне спотворення форми імпульсу, що поширюється в шарі, й швидкість поширення імпульсу вже визначається не фазовою швидкістю, а груповою, що при нормальній дисперсії не перевищує швидкості поперечних хвиль  $c_s$  [70]. Таким чином, крива сигналу від  $t_{\bar{o}}$  до  $t_{=y}$  може формуватися, перш за все, в результаті впливу поперечної бічної хвилі, а також хвилі Лява (поперечної горизонтально поляризованої хвилі). Значення швидкості останньої зазвичай лежить між швидкостями поперечних хвиль в середовищах, що контактують [70]. Ділянку ж сейсмограми при  $t > t_{=y}$  можна асоціювати з приходом цуга каналових хвиль.

Для більш очевидної візуалізації структури сигналу були обчислені залежності середніх квадратів відліків  $\overline{a_{10}^2}(t)$  на часових відрізках, що обирають

уздовж всієї реалізації. Дані залежності можна інтерпретувати як деяку енергетичну характеристику реєстрованого сигналу, якщо врахувати, що амплітуда сигналу  $a(t)$  прямо пропорційна напрузі, що приходить на звукову карту комп'ютера. Отримані нормовані криві при довжині відрізка осереднення 10 мс (441 відлік) і коефіцієнті перекриття – 0,8 показано на рисунку 4.13. Нормування кривих мало сенс в силу таких обставин.

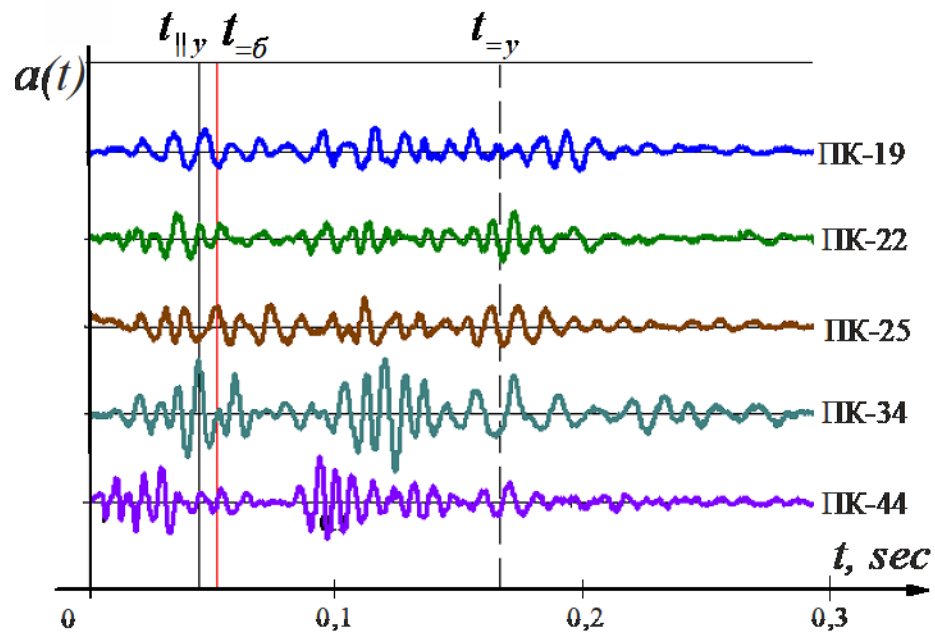


Рисунок 4.12 – Сукупність сейсмограм всіх пікетів, починаючи від моменту вступу

Розглянуті сейсмоакустичні дослідження проводилися в зоні істотних тектонічних порушень, що зумовило значні відмінності інтенсивності зареєстрованих сигналів на різних пікетах. Так, для характеристики, що інтерпретується як енергетична, суми квадратів відліків по довжині сигналу, який дорівнює 300 мс, найбільша величина отримана на пікеті 34. Віднесені до даної величини значення, отримані на пікетах 19, 22, 25 та 44 складають 0,251; 0,209; 0,289 і 0,416 відповідно. Слід зауважити, що між пікетами 19, 22, 25 за результатами відпрацювання пласта були виявлені найбільш суттєві тектонічні порушення [38], [69].

Дані, наведені на рисунках 4.12 і 4.13, свідчать про наявність в кожному з розглянутих сигналів подібних ділянок. Ці ділянки відповідають хвилям, що приходять в точку реєстрації, з істотно різними кінематичними та енергетичними характеристиками. З огляду на значення частотних складових коливань, встановлених у попередніх розділах, розглянемо спектральні особливості окремих ділянок зареєстрованих сигналів.

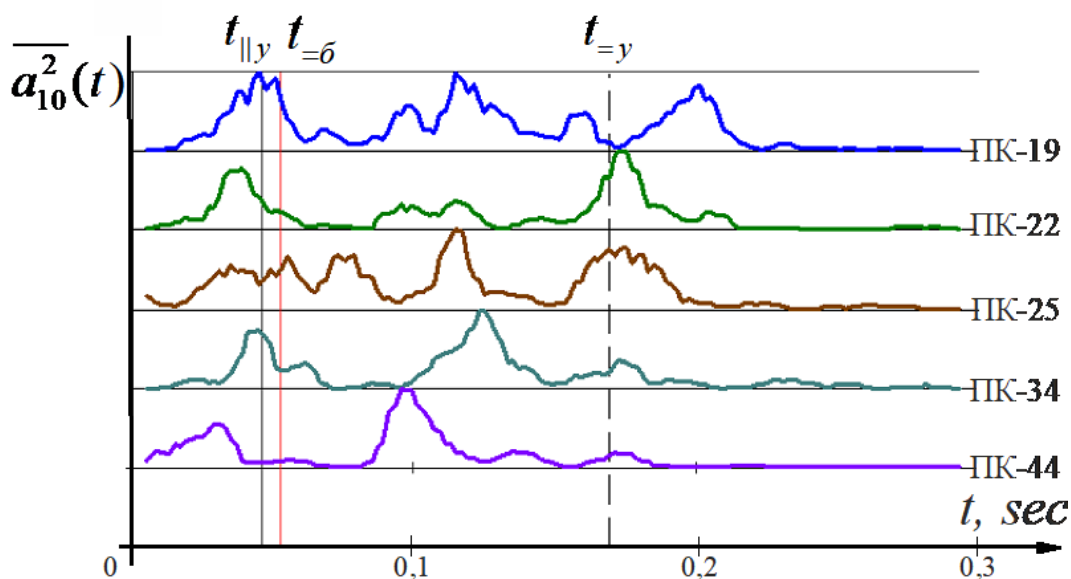


Рисунок 4.13 – Сукупність середніх квадратів відліків сейсмограм ( $\overline{a_{10}^2}(t)$ ) всіх пікетів

Розбивати кожен сигнал на ділянки будемо, виходячи з енергетичної характеристики сигналу кривої  $\overline{a_{10}^2}(t)$ . Рисунок 4.14 ілюструє цю процедуру для сигналу пікету 34, а на рисунку 4.15 показано досліджувані далі ділянки кривої сигналу  $a(t)$  різними способами.

Амплітудний спектр для всього сигналу пікету 34 наведено на рисунку 4.16, а спектри вибраних ділянок на рисунку 4.17.

Розглядаючи отримані залежності необхідно врахувати таке. Залежність коефіцієнта згасання від частоти в гірських породах як для поздовжніх, так і для поперечних хвиль близька до квадратичної [38], внаслідок чого зі збільшенням

пробігу амплітуди високочастотних складових суттєво зменшуються по відношенню до низькочастотних.

Відстань, рівну майже 300 м, при цих дослідженнях практично зумовила відсутність в зареєстрованому сигналі частот з «небезпечного» інтервалу. У той же час на такій великій відстані різниця часів приходу різних видів хвиль дозволяє їх ідентифікувати, що не вдається, як правило, зробити на малих відстанях від руху збудника.

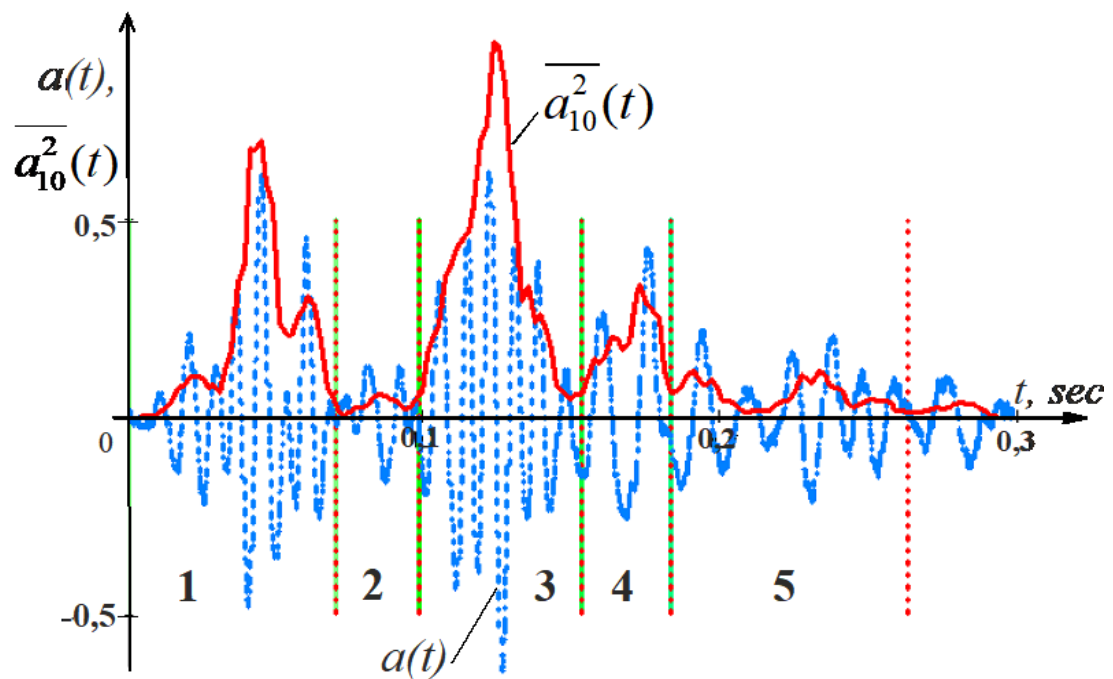


Рисунок 4.14 – Розбиття сейсмограми на відрізки (ПК-34)

Тому при проведенні нижченаведеного аналізу основна увага приділяється порівнянню частотних параметрів коливань, асоційованих з виділеними хвильовими складовими.

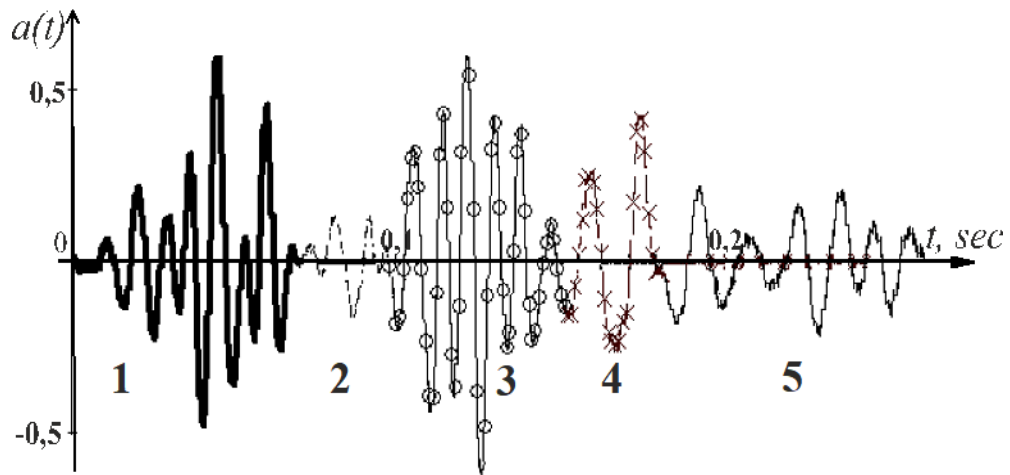


Рисунок 4.15 – Сейсмограма з окремими ділянками (ПК-34)

Роздільна здатність спектра визначається довжиною використовуваної часової реалізації. Хоча формально роздільну здатність можна підвищити, подовжуючи сигнал нульовими відліками, даний прийом не покращує роздільну здатність перетворення, а лише призводить до появи інтерполяційних точок на спектральних кривих [33]. Тому доповнення нулями відповідних відрізків часових рядів виконувалося тільки з метою задоволення вимогам швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) і отримання однакової роздільної здатності частотної характеристики для всіх п'яти відрізків сигналу. Щоб отримати криві з такою же роздільною здатністю по частоті для АЧХ всього сигналу було проведено осереднення по сусідніх частотах. На рисунку 4.16 показано як початкова, так і осереднена криві.

З графіків, наведених на рисунку 4.17, видно, що найбільші частоти отримано для першої й третьої ділянок, які асоційовані з приходом бічних хвиль. У той же час частота максимуму для ділянки, що зв'язується з каналовою хвилею (п'ята ділянка), більш ніж удвічі нижча.



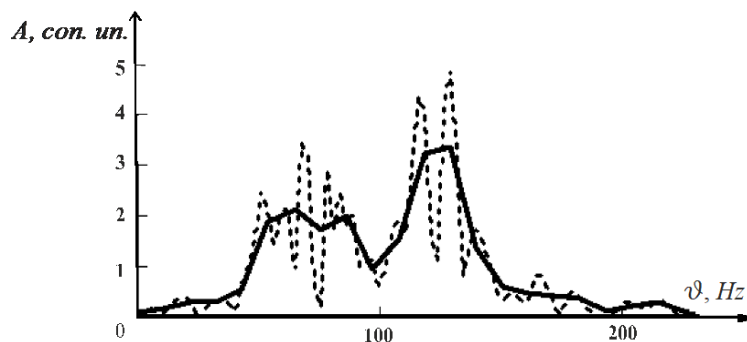


Рисунок 4.16 – Амплітудно-частотна характеристика повної сейсмограми (ПК-34)

З метою більш детального дослідження зміни спектра сигналу, обумовленого приходом різних хвиль в точку реєстрації, було виконано віконне перетворення Фур'є з прямокутним вікном, що рухається по сигналу.

Вибір такої форми вікна обумовлений необхідністю рівноправно врахувати початкову частину сигналу, не вдаючись до побудови будь-яких допоміжних погано обумовлених сигналів. Спектр, побудований для кожного вікна, належить до моменту часу, що відповідає середині вікна.

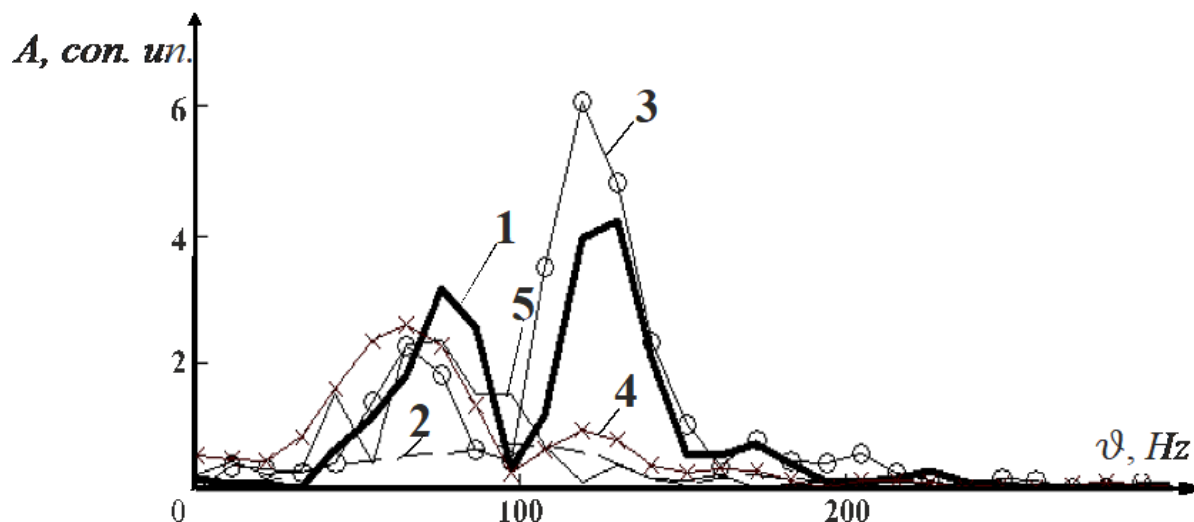


Рисунок 4.17 – Амплітудно-частотні характеристики виділених ділянок сейсмограми (ПК-34)

Потім для кожної частоти серед усіх спектрів визначалося найбільше значення амплітуди  $A_m(\nu)$  й відповідний спектру час  $t_{\max}(\nu)$ , що забезпечував даний максимум. Побудовану таким чином залежність  $t_{\max}(\nu)$  пропонується

розглядати як залежність моментів часу, що відповідає найбільшому вкладу складової з частотою  $\nu$ .

Залежності  $A_m(\nu)$  та  $t_{\max}(\nu)$  для пікету 34 наведено на рисунку 4.18 (довжина вікна – 46 мс (1024 відліку), коефіцієнт перекриття – 0,9). Там же прямими горизонтальними лініями відзначено введені вище моменти часу можливого приходу хвиль різного виду. З графіків випливає, що найбільші внески у відносно високі частоти спостерігаються в часовому проміжку, асоційований з приходом бічних хвиль стиснення і зсуву (до часу  $t_{=y}$ ), а проміжку часу, пов'язаному з приходом каналової хвилі, відповідають максимуми низьких частот.

Аналогічні закономірності спостерігаються й для сигналів, одержаних на інших пікетах. На рисунках 4.19, 4.20 для кожного з пікетів наведено спектри всього сигналу, спектри ділянок, що виділяються за описаною вище процедурою, й залежності  $A_m(\nu)$  та  $t_{\max}(\nu)$ .

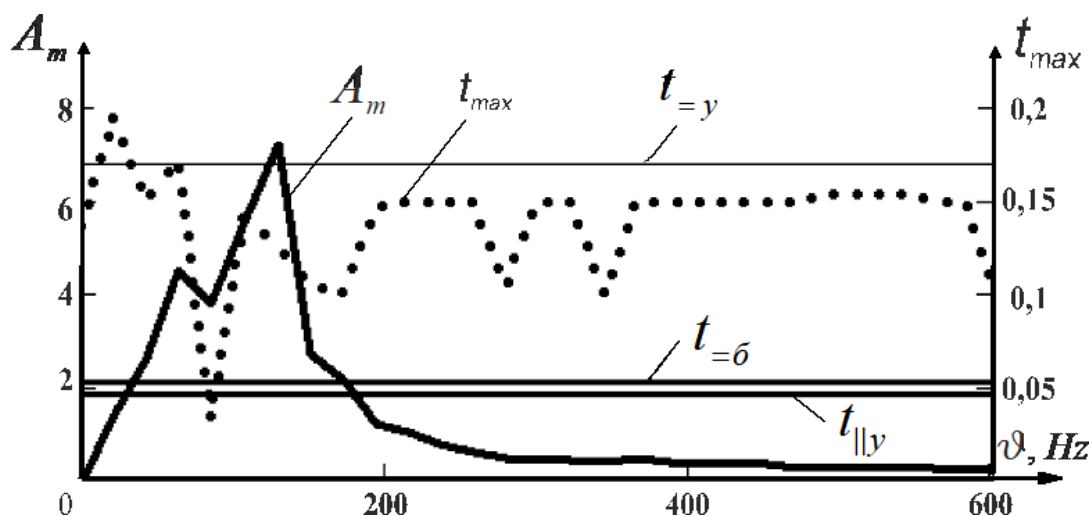


Рисунок 4.18 – Найбільше значення амплітуди спектральної складової ( $A_m(\nu)$ ) та відповідного часу ( $t_{\max}(\nu)$ ) від частоти (ПК-34)

Таким чином, в зареєстрованих сейсмограмах коливання з більш високою частотою пов'язані з приходом в пункт реєстрації бічних хвиль. Це дає можливість припустити, що такі відносно більш високочастотні коливання і їх зміна в процесі спостережень визначаються станом контакту між вугіллям та

вмісними породами, а також станом вмісних порід, в безпосередній близькості від вугільного пласта.

Слід зауважити, що дані експериментально отриманих превалюючих залежностей частот для різних ділянок сейсмограм суперечать результатам теоретичних сейсмограм, наведених у роботі [38]. Основна частота ділянки сейсмограми, асоційованої з приходом поздовжньої бокової хвилі нижче, ніж для ділянки, пов'язаній з приходом каналової хвилі [38]. Цю невідповідність можна пояснити відсутністю у математичній моделі механізму з [38] згасання акустичних хвиль.

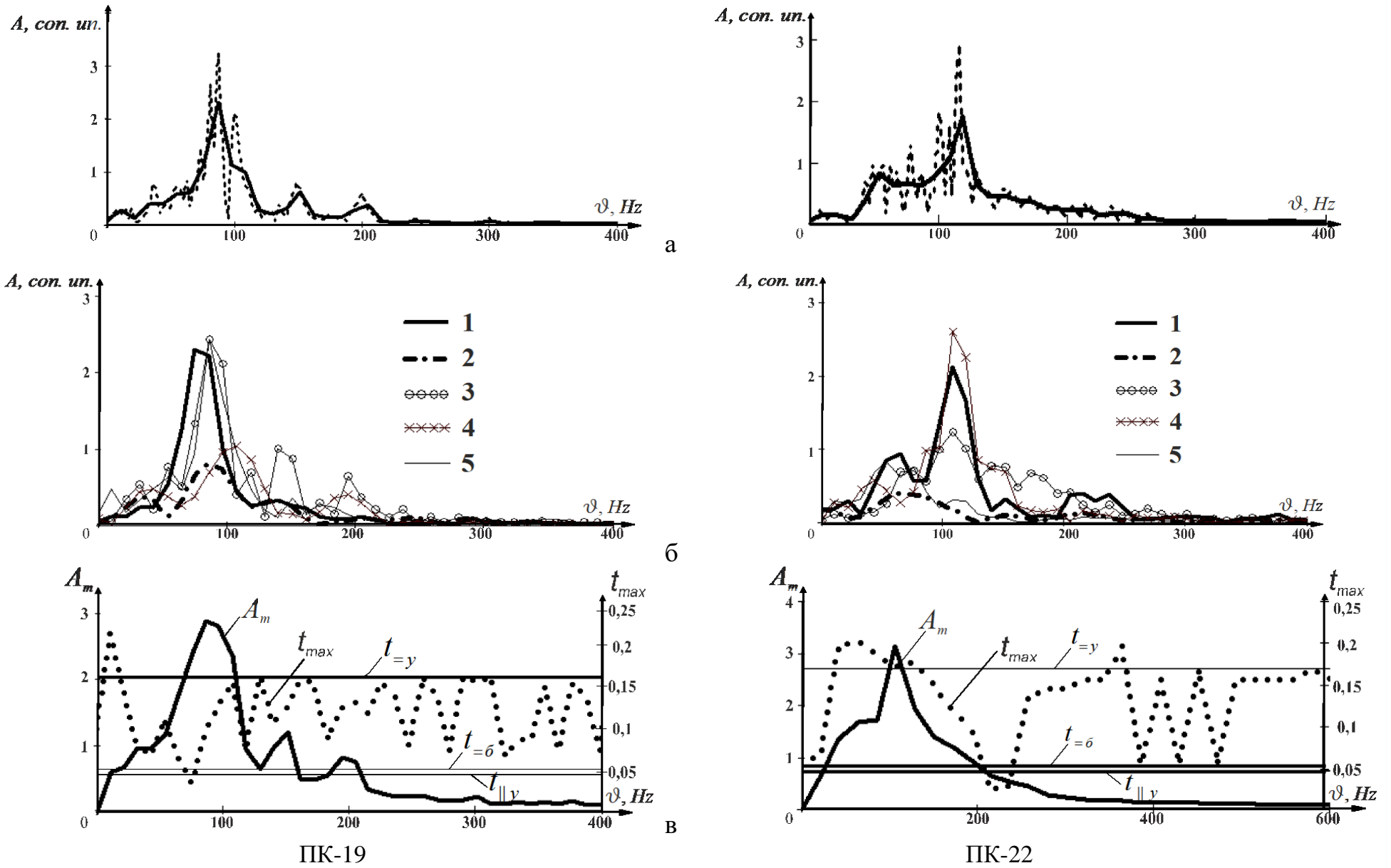


Рисунок 4.19 – АЧХ всього сигналу (а), окремих ділянок (б) і залежності  $A_m(\nu)$  та  $t_{\max}(\nu)$  (в) для ПК-19 і ПК-22

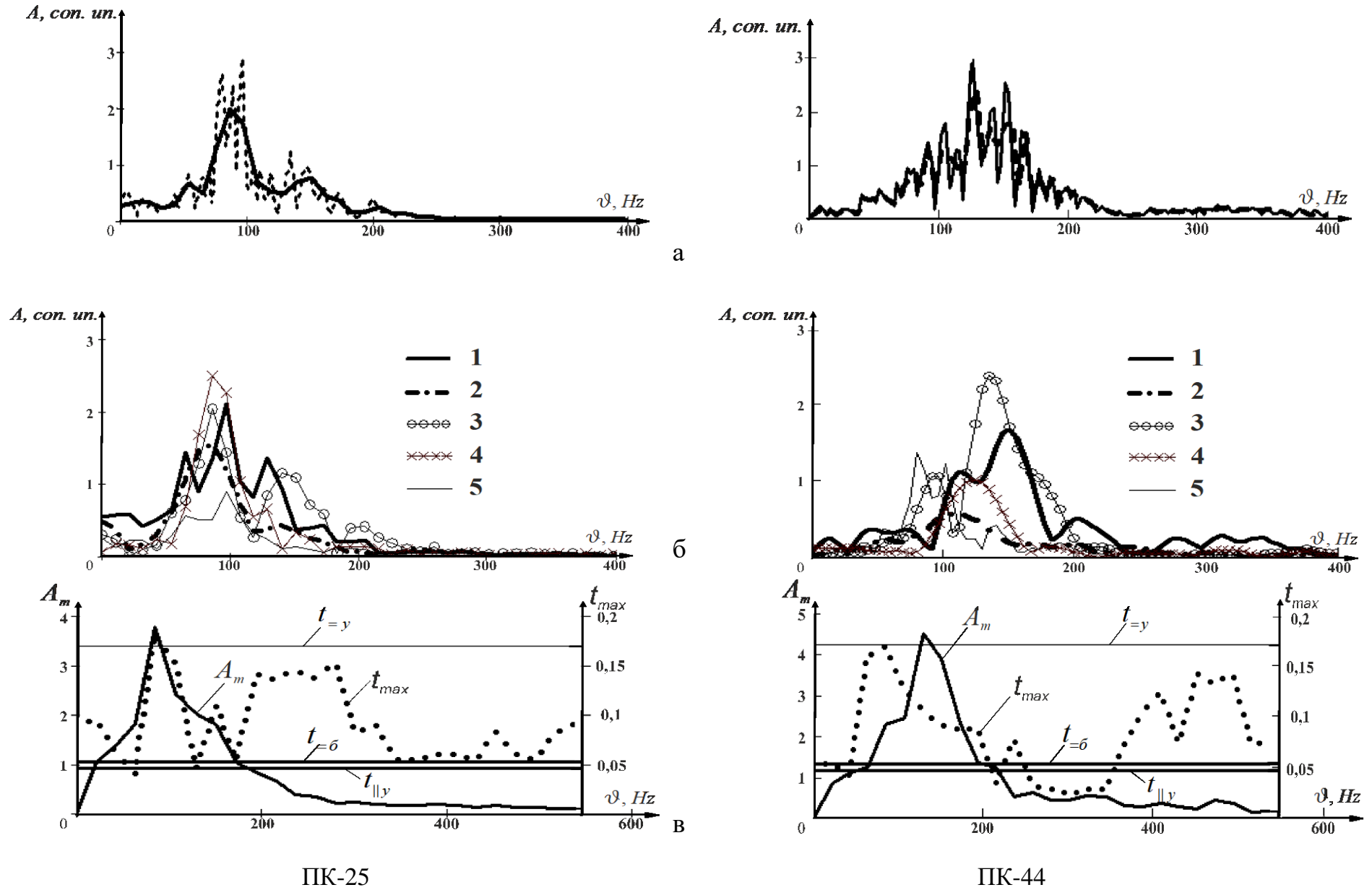


Рисунок 4.20 – АЧХ всього сигналу (а), окремих ділянок (б) і залежності  $A_m(\nu)$  та  $t_{\max}(\nu)$  (в) для ПК-25 і ПК-44

У той же час, з огляду на обмежений експериментальний матеріал, а також досить велику відстань між пунктами збудження і реєстрації в наших дослідженнях, слід з обережністю ставитись до твердження щодо величезного впливу бічних хвиль, коли довжина траси менше 100 м.

## РОЗДІЛ 5 ОБГРУНТУВАННЯ ПРОГНОСТИЧНОГО ПОКАЗНИКА І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В АПАРАТНО-ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ДЛЯ ПРОГНОЗУ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ В ШАХТНИХ УМОВАХ

Дослідження умов старту тріщини в попередньо напружено-деформованому породному масиві (розділ 3), дозволили встановити інтервал частот, в якому збільшення амплітуд коливань може призвести до розвитку ГДЯ. Спектральний аналіз експериментальних даних показав наявність коливань з такими частотами в безпосередній зоні роботи практично всіх застосовуваних у шахтних умовах породоруйнуючих механізмів (розділ 4).

У даному розділі розглядається можливість і порядок використання встановлених закономірностей при прогнозі ГДЯ.

### 5.1 Введення нового прогностичного показника на основі аналізу спектра сигналу

Дотримуючись результатів розділу 3, розглядати прогностичні показники викиднебезпечності слід в зв'язку з характеристиками високочастотної області спектра сейсмоакустичних коливань. Однією з таких характеристик є амплітудно-частотна характеристика реєстрованого сигналу.

Наведені дослідження показали, що збільшення амплітуди коливань в області високих частот (частоти понад 700 Hz) призводить до різкого зменшення критичних довжин тріщин як для вугілля, так і для вмісних порід. При цьому спостерігається стрибкоподібна зміна довжини тріщин, що стартують, і цей факт можна розглядати як провісник динамічного явища.

Тому зростання амплітуди високочастотних складових в реєстрованому акустичному сигналі приймається як індикатор небезпечного стану. Формалізувати його можна в вигляді відношення:

$$K_s = \frac{S_B}{S}, \quad (5.1)$$

де  $S_B$  – площа ділянки спектра, що відповідає високочастотній складовій,  $S$  – загальна площа амплітудно-частотного спектра сигналу.

Очевидно, що площа ділянки спектра в області високих частот не може бути більше загальної площі амплітудно-частотного спектра сигналу, тому межі зміни значень показника  $K_S$  лежать в діапазоні від 0 до 1.

Після обчислення спектра (див. розділ 4) розрахувати значення  $S_B$  і  $S$  не становить труднощів:  $S = \Delta \mathcal{G} \sum_{i=0}^{i_{\max}} A_i$ ;  $S_B = \Delta \mathcal{G} \sum_{i: 700\text{Hz} < \mathcal{G}_i < 1250} A_i$ , де  $\Delta \mathcal{G}$  – крок по частоті на даній ділянці.

Так, для акустичних сигналів, що зареєстровані при роботі комбайна, відбійного молотка, бурінні по породі і роботі стругової установки, спектри яких наведено на рис. 4.2(б) – 4.5, значення показника  $K_S$  дорівнюють 0,29; 0,06; 0,27 і 0,31 відповідно. Всі дані значення отримано в безпечних умовах.

Найбільш складним моментом у використанні пропонованого прогностичного показника є визначення (завдання) його критичного значення, тобто такого значення  $K_S^*$ , що при деякому значенні  $K_S > K_S^*$  видається прогноз «небезпечно».

1. Принциповим моментом є і встановлення критичного значення для прогностичного показника  $K_B$ , що в даний час прийнятий як один з основних сейсмоакустичних показників при прогнозі ГДЯ [8]. Показник  $K_B$  визначений як відношення амплітуд «високочастотної» і «низькочастотної» складових спектра досліджуваного сигналу:

$$K_B = \frac{A_B}{A_H} \quad (5.2)$$

Згідно [8] критичне значення  $K_B^*$  встановлюють на підставі спостережень (вимірювань) значень прогностичного показника в безпечній зоні, що встановлюється іншими методами поточного прогнозу.



Пропонується за такою ж процедурою, тобто виходячи з значень показника в безпечній зоні, встановлювати й критичне значення  $K_S^*$ .

Слід звернути увагу на обов'язкове зазначення проміжку часу, протягом якого прогностичний показник приймає порогові значення. При прогнозуванні ГДЯ виконання критеріального співвідношення  $K > K^*$  для довільного прогностичного показника тільки в певний момент часу не є достатньою умовою для видачі прогнозу «небезпечно», що тягне за собою проведення певних захисних дій і заходів.

Наприклад, при прогнозі викиднебезпечності вугільних пластів за параметрами акустичного сигналу «прогноз «небезпечно» видається, якщо протягом 6 циклів посування вибою не менше, як у двох з них поточні значення прогностичних параметрів акустичних сигналів перевищують критичні» [8, п. 6.3.5.7]. При прогнозі викиднебезпечності по амплітудно-частотних характеристиках акустичного сигналу оператор видає прогноз «небезпечно», якщо «на стрілковому індикаторі стійко реєструється» перевищення критичного значення [8, п. 6.3.4.4].

Таким чином, слід дотримуватися критеріального співвідношення протягом деякого часового проміжку (можливо пов'язаного з просторовим розташуванням джерела коливань). Будемо позначати тривалість такого проміжку  $\Delta T$ .

До того ж, існує обмеження на довжину часового проміжку, що обумовлено процедурою оцінки спектра, яка є основою для обчислення розглянутих прогностичних показників  $K_B$  і  $K_S$ . Тривалість цього проміжку, що позначається далі  $\Delta t$ , була оцінена, виходячи з властивостей сигналів, що реєструються в шахтних умовах, і складає приблизно 3 с [39].

Таким чином, кожне значення прогностичного показника  $i$ , відповідно, кожне перевищення критичного значення прогностичного показника повинно спостерігатися на часовому проміжку довжиною  $\Delta t$ . Для того щоб був виданий прогноз «небезпечно» необхідно, щоб перевищення критичного значення спостерігалось протягом проміжку часу  $\Delta T$ .

2. Істотний недолік критерію, побудованого за показником  $K_B$ , складається у високому значенні помилок першого роду («хибне спрацювання»). Так, при проведенні численних спостережень в різних умовах шахтного видобутку вугілля такі помилки становили від 5% до 47% [50]. Зауважимо, що просто збільшуючи коефіцієнт запасу для критичного значення (по відношенню до нинішнього значення при розвідувальних спостереженнях) і/або збільшуючи величину  $\Delta T$ , можна зменшити помилки першого роду. Однак це неминуче призведе до зростання помилок другого роду, що становлять найбільшу небезпеку.

У загальному випадку компроміс, мабуть, полягає в мінімізації функції  $f(\alpha, \beta) = k_\alpha \alpha + k_\beta \beta$  за наявності обмеження  $\beta \leq \beta_m$ , де  $k_\alpha, k_\beta$  - «ціни» помилок першого й другого роду відповідно;  $\beta_m$  - максимальне допустиме значення помилки другого роду. Однак в даний час відсутні будь-які дані для оцінки параметрів  $(k_\alpha, k_\beta, \beta_m)$  таким чином поставленого завдання.

У той же час, можна дати наступне пояснення високих значень помилок першого роду.

Як зазначалося вище, автори запропонованого прогностичного показника  $K_B$  його фізичне тлумачення пов'язують зі збільшенням амплітуди саме високочастотної складової спектра  $A_B$  [57]. Зменшення же величини  $A_H$ , що також може призвести до зросту прогностичного параметра, не обговорюється і йому не дається ніякого тлумачення. По всій видимості, величина  $A_H$  застосовується в (5.2) значною мірою як нормуюча. Це можна пояснити тим, що зазвичай найбільші амплітудні значення спектра в інтервалі, так званих «середніх частот», 400 – 700 Hz, значно перевершують екстремальні значення АЧХ в «високочастотній» області. Щоб забезпечити реєстрацію високочастотних коливань доводиться застосовувати досить великий коефіцієнт посилення, що, в свою чергу, сильно спотворює або зовсім виводить за межі області реєстрації частину сигналу, що відповідна «середнім» частотам спектра. В якості підтвердження можна вказати на використання в системі АК-1 фільтрів високої і низької частот, що «виключали» з розгляду середню частину спектра [50].

Очевидно, якщо субгармонійні коливання з якої-небудь причини значно зменшаться або взагалі не будуть зареєстровані, а амплітуда високочастотної частини спектра залишиться колишньою, то показник  $K_B$  може прийняти необмежено велике значення, що впливає з рівності (5.2).

Дана обставина, найімовірніше, є головною причиною помилок першого роду при використанні показника  $K_B$ . У той же час пропонується показник  $K_S$  не буде успадковувати цей недолік.

## 5.2 Схема використання двох критеріїв викидонебезпечності вуглепородного масиву

Виходячи з наведених вище переваг, прогностичний показник  $K_S$  можна розглядати як альтернативу показнику  $K_B$ .

Однак на даний момент експериментальних даних, що підтверджують його прогностичні якості, недостатньо, в той час як показник  $K_B$ , хоча його використання істотно ускладнено високими значеннями помилок першого роду для деяких шахт, широко апробований.

Важливо враховувати, що помилки другого роду за критерієм, який було побудовано на показнику  $K_B$ , взагалі не виявлені [50]. Звідси виникає завдання визначення порядку використання обох критеріїв, при якому б у порівнянні з критерієм, що побудований на показнику  $K_B$ , помилки першого роду зменшились, а помилки другого роду залишилися приблизно на тому ж рівні. Слід зауважити, що проблеми, пов'язаної з контролем за обома показниками, немає. Вони обидва можуть бути обчислені за спектром реєстрованого сигналу.

З огляду на взаємну симетричність помилок першого й другого роду та щоб уникнути неясності формулювань детально обговоримо всі використовувані далі позначення і поняття.

Далі будемо розрізняти поняття «небезпечно/безпечно» й «прогноз «небезпечно/безпечно»». Перше означає виконання/невиконання критеріальних

умов при визначенні значень показників в будь-якій «точці» спостережень ( $\Delta t$ ), друге – формування прогнозу на підставі спостережень протягом певного проміжку часу ( $\Delta T$ ).

$H_0 = \{ \text{стан масиву «безпечно»} \}$  – основна гіпотеза (найбільш природний стан);

$\bar{H}_0 = \{ \text{стан масиву «небезпечно»} \}$  – альтернативна гіпотеза (неординарний стан, що вимагає будь-якої реакції);

події

$A_i = \{ \text{видається сигнал «безпечно» по } i\text{-му критерію} \};$

$\bar{A}_i = \{ \text{видається сигнал «небезпечно» по } i\text{-му критерію} \};$

$B = \{ \text{прийнято рішення «безпечно»} \};$

$\bar{B} = \{ \text{прийнято рішення «небезпечно»} \};$

$H_0 \bar{A}_i = \{ \text{помилка першого роду по } i\text{-му критерію («хибне спрацювання», «false positive»)} \};$

$\bar{H}_0 A_i = \{ \text{помилка другого роду по } i\text{-му критерію («пропуск події», «false negative»)} \};$

$H_0 \bar{B} = \{ \text{при прийнятті рішення допущена помилка першого роду} \};$

$\bar{H}_0 B = \{ \text{при прийнятті рішення допущена помилка другого роду} \}.$

$P_{H_0}(\bar{A}_i) = \alpha_i$  – ймовірність помилки першого роду (рівень значущості) по  $i$ -му критерію;

$P_{\bar{H}_0}(A_i) = \beta_i$  – ймовірність помилки другого роду по  $i$ -му критерію;

$P_{H_0}(\bar{B}) = \alpha$  – ймовірність помилки першого роду прийнятого рішення;

$P_{\bar{H}_0}(B) = \beta$  – ймовірність помилки другого роду прийнятого рішення.

Відповідність між різними результатами застосування критеріїв і реалізацією гіпотез наведено в таблиці 5.1. Ймовірності помилок для кожного з критеріїв ( $\alpha_i; \beta_i$ ) вважаємо відомими. Потрібно визначити  $\alpha$  і  $\beta$ .

Шукані значення ймовірностей помилок першого і другого роду визначаються тим, як формується загальне рішення за критеріями, тобто в разі

двох критеріїв, видом залежності  $B = f(A_1, A_2)$  (перший критерій пов'язаний з показником  $K_B$ , другий критерій пов'язаний з показником  $K_S$ ).

Таблиця 5.1 – Ймовірності подій при виконанні гіпотез для  $i$ -го критерію

Подія	Ймовірності подій при справедливості відповідних гіпотез	
	$H_0$	$\bar{H}_0$
$A_i = \{\text{сигнал – «безпечно»}\}$	$1 - \alpha_i$	$\beta_i$
$\bar{A}_i = \{\text{сигнал – «небезпечно»}\}$	$\alpha_i$	$1 - \beta_i$

Розглянемо два можливих способи прийняття рішення

$$1. \quad B = A_1 A_2, \quad (5.3)$$

тобто рішення «безпечно» приймається, коли обидва критерії видають прогноз «безпечно». Тоді  $\bar{B} = \overline{A_1 A_2} = \bar{A}_1 + \bar{A}_2$  і

$$\begin{aligned} \alpha &= P_{H_0}(\bar{B}) = P_{H_0}(\bar{A}_1 + \bar{A}_2) = P_{H_0}(\bar{A}_1) + P_{H_0}(\bar{A}_2) - P_{H_0}(\bar{A}_1)P_{H_0\bar{A}_1}(\bar{A}_2) = \\ &= \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1\alpha_{2(1)} = \alpha_1 + \alpha_2(1 - \alpha_{2(1)}\frac{\alpha_1}{\alpha_2}) \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\beta = P_{\bar{H}_0}(B) = P_{\bar{H}_0}(A_1 A_2) = P_{\bar{H}_0}(A_1)P_{\bar{H}_0 A_1}(A_2) = \beta_1\beta_{2(1)}, \quad (5.5)$$

де  $\alpha_{2(1)}$  і  $\beta_{2(1)}$  – ймовірності «умовних» помилок першого і другого роду, тобто ймовірності помилок за другим критерієм при умові, що відбулися помилки по першому.

Якщо помилки за різними критеріями незалежні, то  $\alpha_{2(1)} = \alpha_2$  і  $\beta_{2(1)} = \beta_2$ . Однак таку ситуацію слід вважати граничною, в силу очевидної залежності між подіями  $A_1$  і  $A_2$  (в іншому випадку критерії були б «поганими»). Тому слід вважати, що  $\alpha_{2(1)}$  і  $\beta_{2(1)}$  відповідно більше  $\alpha_2$  і  $\beta_2$ , а крім того однойменні помилки за цими двома критеріями мають близькі значення.

У даному випадку помилки другого роду зменшуються, але помилки першого роду стають ще більше, що суперечить поставленій вище мети.

$$2. \quad B = A_1 + A_2, \quad (5.6)$$

тобто рішення «безпечно» приймається, коли хоча б один з критеріїв видає прогноз «безпечно». Тоді  $\bar{B} = \overline{A_1 + A_2} = \bar{A}_1 \bar{A}_2$  і

$$\alpha = P_{H_0}(\bar{B}) = P_{H_0}(\bar{A}_1 \bar{A}_2) = P_{H_0}(\bar{A}_1) \cdot P_{H_0 \bar{A}_1}(\bar{A}_2) = \alpha_1 \cdot \alpha_{2(1)}, \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} \beta &= P_{\bar{H}_0}(B) = P_{\bar{H}_0}(A_1 + A_2) = P_{\bar{H}_0}(A_1) + P_{\bar{H}_0}(A_2) - P_{\bar{H}_0}(A_1) \cdot P_{\bar{H}_0 A_1}(A_2) = \\ &= \beta_1 + \beta_2 - \beta_1 \cdot \beta_{2(1)} = \beta_1 + \beta_2 \cdot \left(1 - \beta_{2(1)} \cdot \frac{\beta_1}{\beta_2}\right). \end{aligned} \quad (5.8)$$

Отже, в цьому випадку помилки першого роду зменшуються. Помилки другого роду збільшуються, однак в силу відомого малого значення  $\beta_1$  і наведених вище оцінок для  $\beta_{2(1)}$  та  $\beta_2$  вважатимемо це зростання допустимим.

Таким чином, перевагу слід віддати другому з розглянутих способів прийняття рішення за двома критеріями, що забезпечує зниження помилок першого роду.

Однак при формуванні умов для видачі прогнозу «безпечно» врахуємо недостатню експериментальну доведеність прогнозу за другим критерієм, шляхом додаткового контролю лише за першим критерієм зі збільшенням удвічі часового проміжку. У цьому випадку умову для видачі прогнозу «безпечно» можна представити у вигляді:

$$(A_1 + A_2) \Big|_{t \in [t_0, t_0 + \Delta T]} \cdot A_1 \Big|_{t \in [t_1, t_1 + 2\Delta T]}, \quad (5.9)$$

де  $t_0, t_1$  – будь-які моменти часу з інтервалу спостережень.

Умова видачі прогнозу «безпечно», виражена через критеріальні відносини, має вигляд:

$$\left[ (K_S < K_S^*) + (K_B < K_B^*) \right]_{t \in [t_0, t_0 + \Delta T]} \cdot (K_B < K_B^*)_{t \in [t_1, t_1 + 2\Delta T]} \quad (5.10)$$

Відповідна умова видачі прогнозу «небезпечно»:

$$\left[ (K_S > K_S^*) \cdot (K_B > K_B^*) \right]_{t \in [t_0, t_0 + \Delta T]} + (K_B > K_B^*)_{t \in [t_1, t_1 + 2\Delta T]} \quad (5.11)$$

Проведемо кількісну оцінку отриманих результатів зменшення ймовірностей помилок першого роду за прийнятою схемою використання двох критеріїв викидонебезпечності. Згідно з експериментальними даними ймовірності помилок першого роду за першим критерієм складають 0,05 - 0,47 для різних шахт [50], тобто  $\alpha_1 \in [0,05; 0,47]$ . Тоді значення ймовірностей помилок першого роду за другим критерієм можна розглянути такі:

$$1) \quad \alpha_2 \leq 0,47,$$

$$2) \quad \alpha_2 > 0,47.$$

Як розділ значень прийнято верхню межу 0,47 ймовірності помилок першого роду за першим критерієм. У виразі (5.7) показано, що другий імовірнісний сценарій (5.6) з двох способів прийняття рішення за двома критеріями забезпечує зниження помилок першого роду в  $\frac{1}{\alpha_{2(1)}}$  рази, де  $\alpha_{2(1)}$  – ймовірність помилок першого роду за другим критерієм за умови, що за першим критерієм сталася помилка першого роду.

Розглянемо перший випадок: ймовірність помилки першого роду за другим критерієм  $\alpha_2 \leq 0,47$ . Тоді «умовна» ймовірність помилки першого роду за другим критерієм  $\alpha_{2(1)}$  може також приймати значення, що менші, рівні або більше за 0,47. При значеннях  $\alpha_{2(1)} \leq 0,47$  і  $\alpha_{2(1)} > 0,47$  маємо відповідно такі оцінки

$$\frac{1}{\alpha_{2(1)}} \geq 2,13, \quad 1 < \frac{1}{\alpha_{2(1)}} < 2,13$$

зменшення ймовірностей помилок першого роду моделі прийняття рішення (5.6).

Розглянемо другий випадок: ймовірність помилки першого роду за другим критерієм  $\alpha_2 > 0,47$ . Міркуючи аналогічно, отримуємо такі оцінки  $\frac{1}{\alpha_{2(1)}} \geq 2,13,$

$$1 < \frac{1}{\alpha_{2(1)}} < 2,13$$

зменшення ймовірностей помилок першого роду моделі прийняття рішення (5.6). Без обмеження спільності вважаємо, що ймовірність помилок

першого роду моделі прийняття рішення (5.6) зменшується в приблизно в 1,5 – 2,1 разів.

### **5.3 Застосування прогностичних показників газодинамічних явищ в апаратно-програмному комплексі**

Запропоновані у розділі 5.2 умови формування прогнозу ГДЯ були використані при розробці апаратно-програмного шахтного сейсмоакустичного комплексу. Комплекс був розроблений в рамках виконання Державним ВНЗ «НГУ» науково-технічної роботи за договором №ДЗ/151-2016. Дослідний зразок комплексу пройшов у 2017 році попередні випробування в лабораторних та шахтних умовах (ВП «Шахта «Торецька» і ВП «Шахта «Центральна» ДП «Торецьквугілля», ПАТ «ШУ «Покровське»).

На даний час на шахтах, що видобувають вугілля з пластів, небезпечних або загрозливих з газодинамічних явищ, нормативно дозволено використовувати три типи апаратури – ЗУА, АК-1 та АПСС-1. Деякі шахти мають спроби використання іскробезпечної сейсмічної системи ARAMIS M/F для моніторингу сейсмічної небезпеки разом з АПСС-1. Теоретичним підґрунтям прогнозу ГДЯ за допомогою ЗУА є акустична емісія. Щодо ефективності та правомірності цього підходу серед фахівців вже багато років йде дискусія. Доцільність використання цієї апаратури, особливо враховуючи постійне пониження глибини ведення робіт та об'єктивну зміну при цьому фізико-механічних властивостей середовища, на яких ґрунтується цей алгоритм розпізнавання катастрофічних ситуацій, викликає сумнів.

Ідеологія апаратури типу АПСС-1 найбільш близька до ідеології розробленого апаратно-програмного комплексу. Апаратура АПСС-1 базується на елементній базі 80-х років, а достовірність прогнозу «небезпечно», що здійснюється на ній, складає приблизно 30% [71]. Кожен з існуючих способів прогнозу ГДЯ, який забезпечується з використанням названої вище апаратури, має свій рівень помилок другого роду, що в основному не перевищує 3%, рівень



помилки першого роду знаходяться в діапазоні 15 - 30% (тобто виявляє помилкові небезпечні зони, застосування противикидних заходів, які призводить до додаткових фінансових витрат) [71]. В роботі [50] спосіб прогнозу ГДЯ, що забезпечується з використанням апаратури АК-1м, має рівень помилок першого роду в діапазоні 5 - 47%, помилки другого роду відсутні. Розроблену у Державному ВНЗ «НГУ» апаратуру типу АК-1 та АК-1м слід розглядати як прародича розробленого комплексу. Морально апаратура цих типів також застаріла, але досвід, що був накопичений при виготовленні та експлуатації цього обладнання на шахтах Донбаса був врахований у даній розробці.

Зазначимо також, що виробники систем ЗУА та АПСС-1 залишилися на тимчасово неконтрольованій території на сході України, а усі організації та установи, що забезпечували використання вказаних систем, фактично припинили своє існування. Комплекс складається з апаратної та програмної частин (рис. 5.1). Апаратна частина комплексу складається з підземної частини (сейсмоприймач/геофон), наземної частини (наземний блок), персонального комп'ютера служби прогнозу ГДЯ шахти.

Підземна частина (сейсмоприймач) (рис. 5.2) забезпечує виконання таких функцій: приймання акустичних коливань, що поширюються у породному середовищі; перетворювання акустичних коливань у електричні коливання та їх підсилення; модуляція високочастотного сигналу; передача модульованого електричного сигналу лінією зв'язку на поверхню.

Перетворювач механічних коливань в електричні – п'єзоелемент, несуча частота – 50 МГц, модуляція фазова.

Наземний блок (рис. 5.3) виконує такі функції: забезпечення живлення підземної частини (сейсмоприймача) через лінію зв'язку; демодуляція та підсилення демодульованого сигналу, формування вихідного сигналу з параметрами, що відповідають умовам на вхідний сигнал звукової карти комп'ютера.

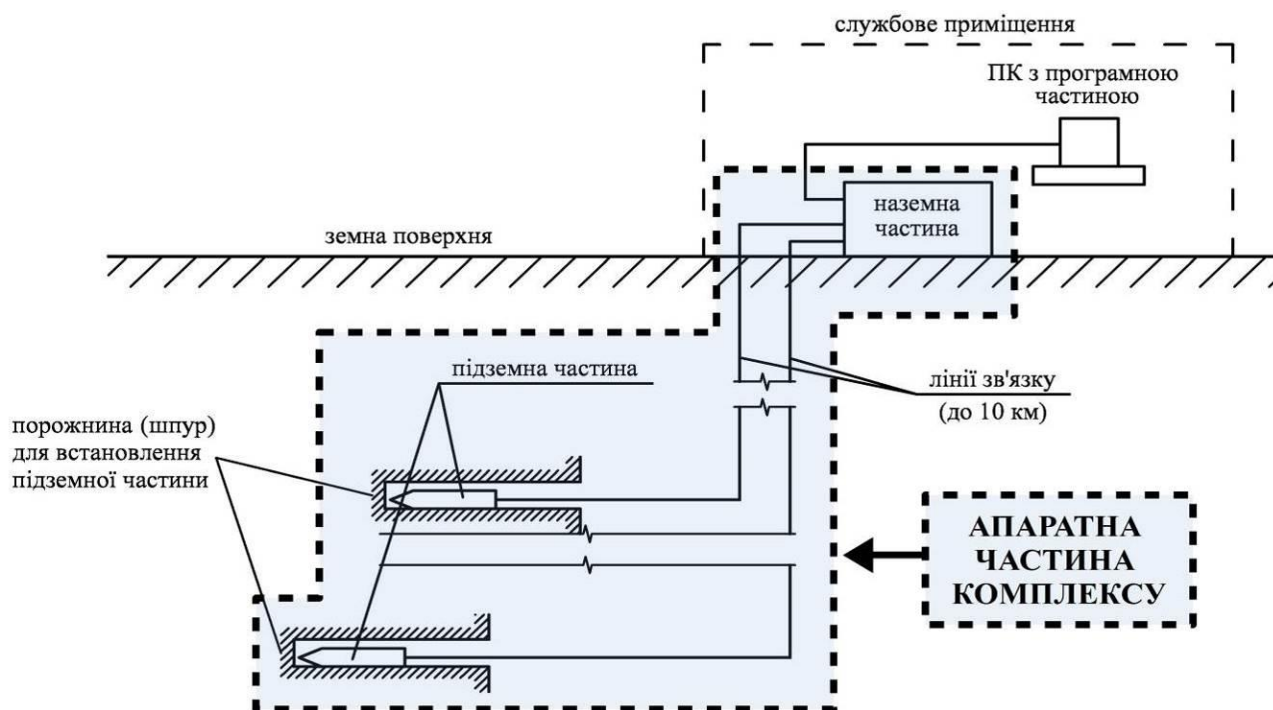


Рисунок 5.1 – Схема функціональних частин програмно-апаратного комплексу

Живлення блока – змінна напруга  $220\text{ V}$  з частотою  $50\text{ Hz}$ , найбільший активний електричний опір лінії між поверхневим блоком та геофоном –  $700\ \Omega$ , частота зрізу низькочастотного фільтра –  $3500\text{ Hz}$ , крутизна зрізу фільтра низької частоти –  $21\text{ dB/octave}$ .



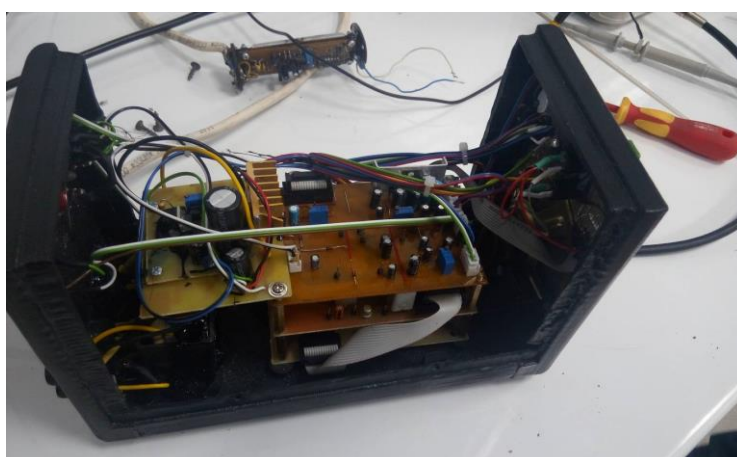
Рисунок 5.2 – Свердловинний п'єзоелектричний геофон



а



б



в

Рисунок 5.3 – Наземний блок у зібраному вигляді:  
а – лицьова сторона; б – тильна сторона; в – без кришки: вигляд зліва

Програмна частина комплексу – це програмне забезпечення (ПЗ) для багатопараметричної обробки акустичної інформації, що встановлюється на комп'ютері служби прогнозу ГДЯ шахти.

Основні складові програмного комплексу показано на рис. 5.4. Умови видачі прогнозу «небезпечно», наведені у розділі 5.2, використано у Модулі аналізу.

При цьому Модуль ШПФ забезпечував обчислення спектра сигналу, дані якого передавалися у Модулі аналізу за критеріями 1 і 2 (за показниками  $K_B$  і  $K_S$ ).

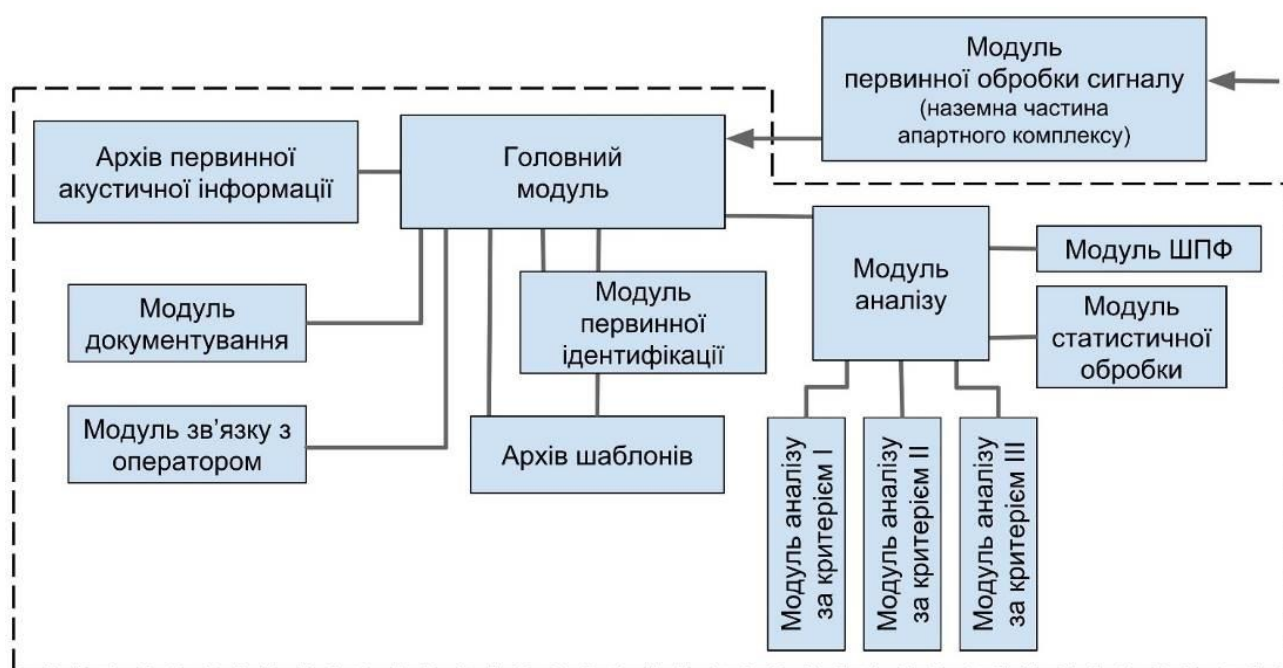


Рисунок 5.4 – Схема функціональних частин програмного комплексу

Отримані значення для індикаторів за критеріями далі безпосередньо використовувались для перевірки умов (5.11). Блок-схема частини Модуля аналізу, пов'язана з обчисленням умов прогнозу «небезпечно», наведена на рисунках 5.5 та 5.6.

За результатами випробувань дослідного зразка апаратно-програмного комплексу в лабораторних умовах (рис. 5.7, 5.8) були вдосконалені окремі складові комплексу.

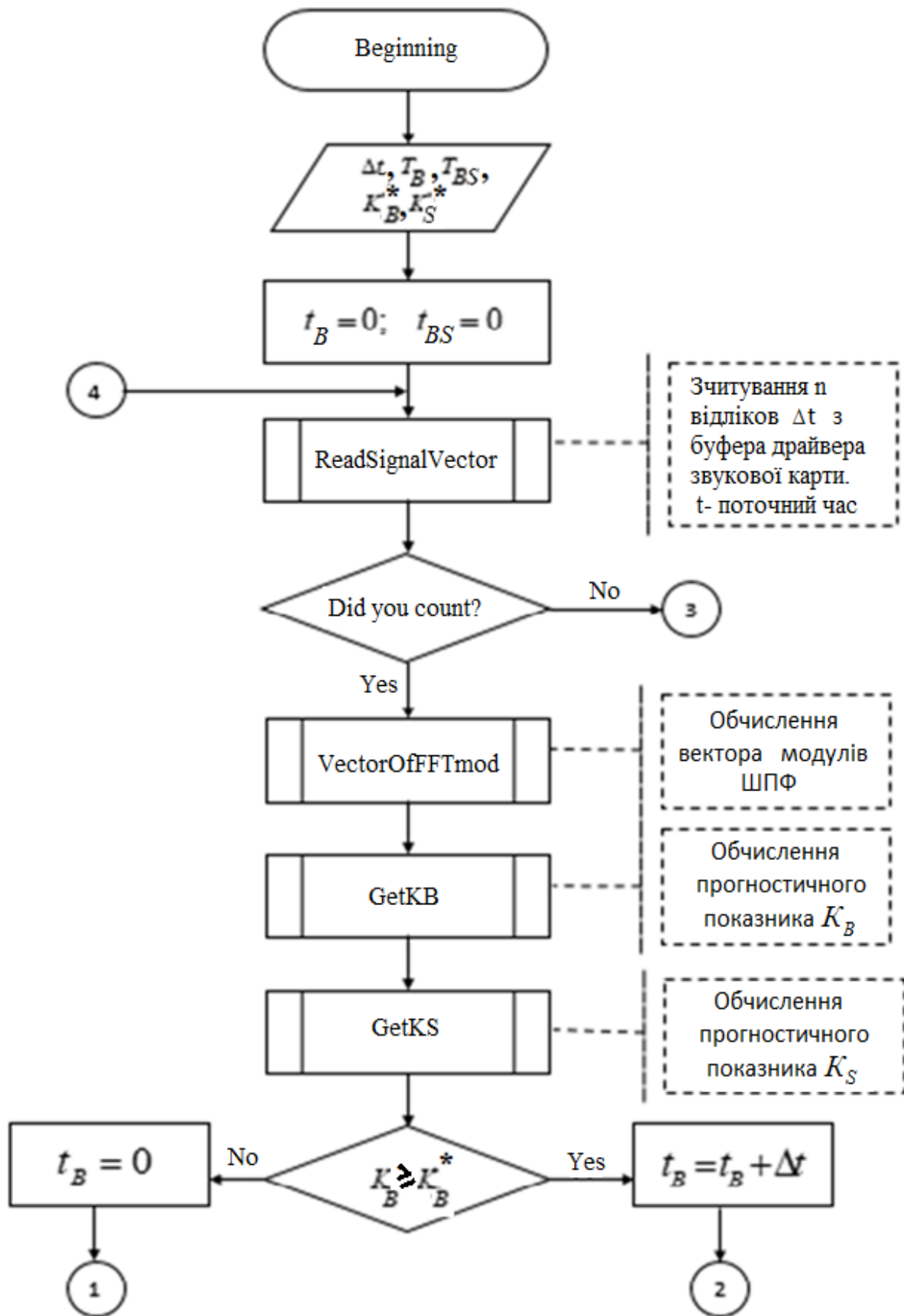


Рисунок 5.5 – Блок-схема частини Модуля аналізу, що пов'язана з обчисленням умов прогнозу «небезпечно». Початок (усього 2 сторінки)

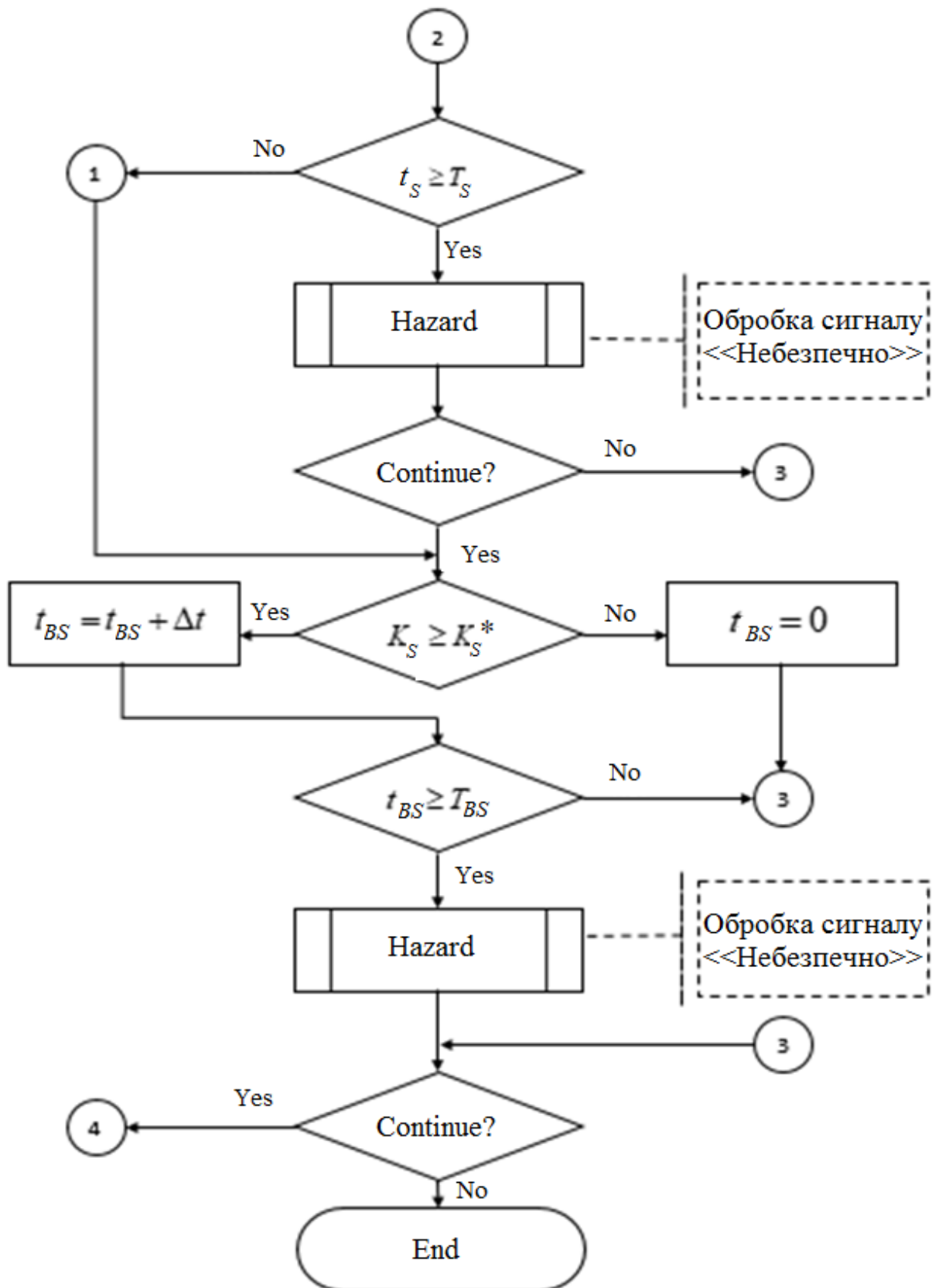
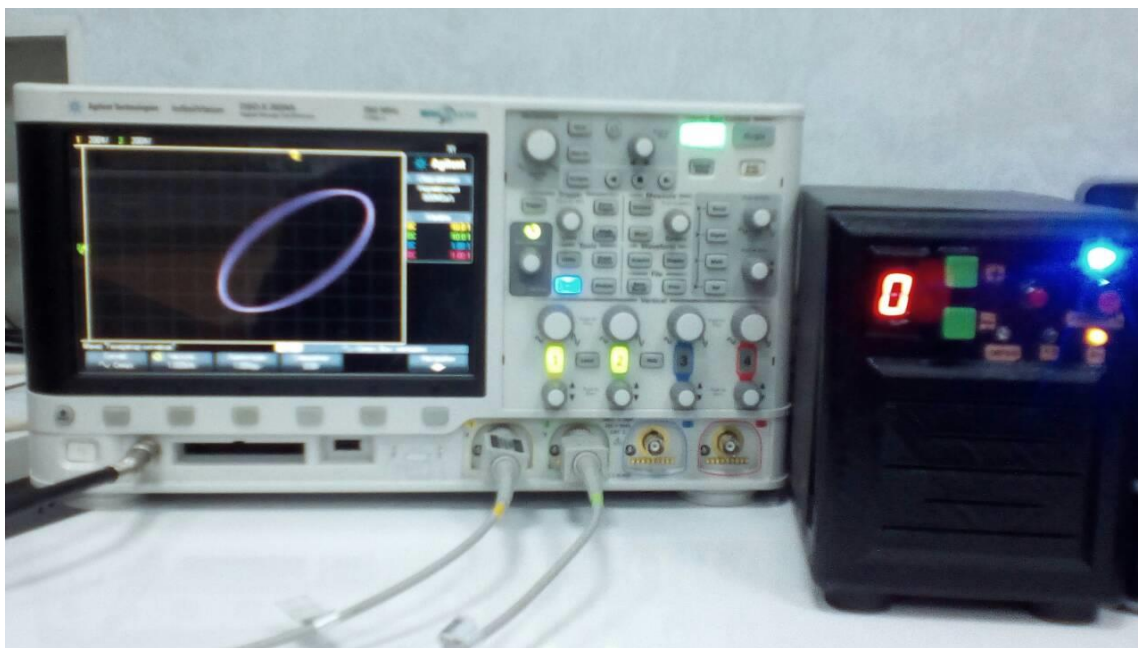


Рисунок 5.6 – Блок-схема частини Модуля аналізу, що пов'язана з обчисленням умов прогнозу «небезпечно». Завершення



а



б

Рисунок 5.7 – Процес калібрування наземного блока (а) на налагодження програмної частини комплексу (б)



Рисунок 5.8 – Випробування апаратно-програмного комплексу на вібраційному стенді ВЕДС-400А

По-перше, в якості оцінки в породному масиві коливань небезпечного інтервалу частот запропоновано використовувати прогностичний показник  $K_s = \frac{S_B}{S}$ , що є відношенням площі ділянки спектра, який відповідає високочастотним складовим  $S_B$  до загальної площі амплітудно-частотного спектра сигналу  $S$ . По-друге, проаналізовано схеми з двома прогностичними показниками для прогнозу ГДЯ з метою зменшення помилок першого й другого роду та обґрунтована умова видачі прогнозу «небезпечно»:

$$\left[ (K_S > K_S^*) \cap (K_B > K_B^*) \right]_{t \in [t_0, t_0 + \Delta T]} \cup (K_B > K_B^*)_{t \in [t_1, t_1 + 2\Delta T]},$$

де  $K_B^*, K_S^*$  – критичні значення показників  $K_B, K_S$ ;  $t_0, t_1$  – будь-які моменти часу з інтервалу спостереження;  $\Delta T$  – максимальне допустиме значення часового інтервалу перевищення показниками критичних значень. Запропонована умова прогнозу ГДЯ застосована в розробленому апаратно-програмному шахтному сейсмоакустичному комплексі. Комплекс виготовлений, відкалібрований на вібраційному стенді й пройшов апробацію в шахтних умовах на шахтах «Торецька», «Центральна» ДП «Торецьквугілля» та ПАТ «ШУ «Покровське».



**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Шашенко О.М. Механіка гірських порід: навчальний посібник / О.М. Шашенко.– Д.: Національна гірнича академія України, 2002. – 302 с.
2. Радченко О.Г. Мінеєв С.П., Рубінський О.О., Вітушко О.В. Гірничі роботи в складних умовах на викидонебезпечних вугільних пластах. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2016. – 603 с.
3. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т. / за ред. В.С. Білецького. – Д.: Донбас, 2004. – Т. 1 : А – К. – 640 с.
4. Баранов В., Антипович Я., Стефанко С. Фрикційні явища у вугільних шахтах: причини, наслідки та вплив на газодинамічні явища. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія, 3(102), 2023. С. 5-9. Режим доступу: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.102.01>
5. Нормативні акти про охорону праці (НПАОП). НПАОП 10.0-5.26-88. Інструкція з безпечного ведення гірничих робіт на шахтах, що розробляють пласти, схильні до гірських ударів (дійсна на цей момент, 2024).
6. А.С. 1333853. Мірер С.В., Масленніков Е.В., Хмара О.І. Спосіб акустичного прогнозу викидонебезпечності вугільних пластів та пристрій для його здійснення.
7. Шашенко О.М. Спосіб діагностики гірського масиву. Патент на винахід № 43239А Україна, МКИ E21 F5/00. О.М. Шашенко, Е.В. Масленніков, заявл. 24.04.2001, опубл. 15.11.2001, бюл. №10. – I-II с.
8. «Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ». СОУ 10.1.00174088.011-2005, розділи 6.3.4, 6.3.5. – С. 34-38.
9. Посібник із застосування на шахтах Донбасу способу автоматизованого контролю викидонебезпеки в очисних виробках за параметрами техногенного акустичного сигналу. Затв. Державним департаментом вугільної промисловості МІНПАЛІВЕНЕРГО України 12.12.2000. Макіївка, 2000. – 12 с.
10. Булат А.Ф., Макєєв С.Ю., Каргаполов А.Н., Звягільський Ю.Л., Бокій Б.В., Шкурат Є.В. Сейсмоакустична система контролю напружено-деформованого

стану масиву Зб. наук. праць «Геотехнічна механіка». Випуск 82/2009. Режим доступу:

<http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/32986/01-Bulat.pdf?sequence=1>

11. Mendecki A.J. Seismic monitoring in mines. – London: Chapman and Hall, 1997. – 193 p.

12. Hildyard M. W, Milev A. M. Simulated rockburst experiment: development of a numerical model for seismic wave propagation from the blast, and forward analysis. J. South Afr. Inst. Min. Metall., 2001. – P. 235–245.

Режим доступу: <https://www.saimm.co.za/Journal/v101n05p235.pdf>

13. Wasko Andrzej. Zastosowanie aparatury sejsmoakustycznej CYRIS do prowadzenia stacjonarnych obserwacji sejsmoakustycznych // Prz. gor. (Przegląd Górniczy) – 2006. – Т. 62. – № 9. – P. 18–21.

14. Oser K., Isakow Z., Trenczek S. Rozpoznanie stanu górotworu za pomocą nowoczesnej aparatury pomiarowej PASAT M. Budownictwo Górnicze i Tunelowe – 2012. – № 4 – P. 37-49.

Режим доступу: [https://sbc.org.pl/Content/272076/BGiT\\_2012\\_R000\\_004.pdf](https://sbc.org.pl/Content/272076/BGiT_2012_R000_004.pdf)

15. Xianwei Luo, Feng Gao. Microseismic Monitoring and Disasters Control of a Large Range of Underground Mining. Advanced Materials Research. ISSN: 1662-8985, Vols. 616-618, pp 320–325. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.616-618.320. Trans. Tech. Publications, Switzerland, 2013.

16. Chen T. Prediction of coal seam methane enriched areas using seismic data. / Chen Tongjun, Cui Ruofei, Liu Enru, Lang Yuquan. // J. China Univ. Mining and Technol. Engl. Ed. – 2006. – Vol. 16. – № 4. – P. 421–424.

17. Zheqiang Shi. Properties of dynamic rupture and energy partition in a solid with a frictional interface. / S. Zheqiang, B.-Z. Yehuda. A. Needleman // J. Mech. Phys. Solids. – 2008. – Vol. 56. – № 1. – P. 5–24.

18. Wang H. Acoustic emission/microseismic source location analysis for a limestone mine exhibiting high horizontal stresses. / H. Wang, M. Ge // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – July 2008. – Vol. 45. – № 5. – P. 720-728.

19. Broberg K. B. Cracks and Fracture. Academic Press, London, 1999.

Режим доступа:

[https://books.google.com.ua/books?id=P79Fk7l5Nn0C&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ua/books?id=P79Fk7l5Nn0C&printsec=frontcover&hl=ru&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

20. Gramberg J. A non-conventional view on rock mechanics and fracture mechanics // Taylor & Francis. 1988. 264 p.

Режим доступа: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/bfbf24ff-273b-4c31-b19a-566989fccb81>

21. Cundall P.A. Numerical modeling of jointed and faulted rock. // Mechanics of Jointed and faulted Rock (ed. H. P. Rossmanith). A.A. Balkema. Rotterdam, 1990. – P. 11-18.

22. Amadei B., Stephansson O. Rock Stress and Its Measurement. Chapman & Hall, 1997. – 501 p.

Режим доступа: <https://books.google.com.ua/books?isbn=0412447002>

23. Bagdassarov N. Fundamentals of rock physics. Cambridge University Press, 2021. – 562 p.

Режим доступа:

[https://books.google.com.ua/books/about/Fundamentals\\_of\\_Rock\\_Physics.html?id=Z71yZgEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ua/books/about/Fundamentals_of_Rock_Physics.html?id=Z71yZgEACAAJ&redir_esc=y)

24. Wang, Chun Hui. Introduction to Fracture Mechanics. 1996.

DOI: 10.13140/RG.2.1.1444.2408

25. Griffith A.A. The phenomena of rupture and flow in solids. //Philos. Trans. of Roy. Soc. of London, 1920. – P. 163-198.

Режим доступа: <http://mbarkey.eng.ua.edu/courses/AEM644/Griffith1921fracture.pdf>

26. Morozov N.F., Petrov Yu.V. Problems of the dynamics of destruction of solids. Springer-Verlag, Berlin, 2000.

27. Kashtanov A., Petrov Yu.V. Kinetic description of incubation processes under dynamic fracture. May 2007, Mechanics 52(5). Pp. 270-273.

DOI: 10.1134/S1028335807050072

28. Andreev George E. Brittle failure of rock materials: test results and constitutive models. Rotterdam: A.A. Balkema, 1995. – 446 p.

Режим доступу: <https://books.google.com.ua/books?isbn=9054106026>

29. Ghamgosar M., Erarslan N., Tehrani K. Laboratory investigations of fracture toughness and tensile strength for various rock types. Proceedings of the 2016 International Symposium of the International Society for Rock Mechanics. Cappadocia region, Turkey, 2016. – P. 223-229. Режим доступу: [https://www.researchgate.net/profile/Morteza\\_Ghamgosar2/publication/305441635](https://www.researchgate.net/profile/Morteza_Ghamgosar2/publication/305441635)

30. Ishida H., Endo T. Study on crack propagation tests using large-scale concrete specimens. Proceedings of the Second International Conf. on Fracture and Damage of Concrete and Rock. Vienna. Austria. – November 1992. – P. 455-462.

Режим доступу: <https://books.google.com.ua/books?isbn=0203474597>

31. Hoek E., Martin C.D. Fracture initiation and propagation in intact rock – A review. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Volume 6, Issue 4, August 2014. – P. 287-300.

32. Janssen M., Zuidema J., Wanhill R. J. H. Fracture Mechanics. An Engineering Primer. 2nd Edition, 2002-2006. (E-book)

33. S. Lawrence Marple, Jr. Digital spectral analysis with applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987.

34. Smith S.V. Digital signal processing: a practical guide for engineers and scientists, 1<sup>st</sup> ed. 2013.

35. Szolík I., Kováč K., Smieško V. Influence of Digital Signal Processing on Precision of Power Quality Parameters Measurement. MEASUREMENT SCIENCE REVIEW, Volume 3, Section 1, 2003.

Режим доступу: <https://www.measurement.sk/2003/S1/Szolik.pdf>

36. Головка Ю.М. Спектральне оцінювання широкосмугового шумового сигналу обмеженої тривалості. Математичне моделювання. – Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет. – 2023. – № 2 (49). – С. 51 – 63. Режим доступу: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(49\)2023.236123](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(49)2023.236123)

37. Синайський Є.С., Новикова Л.В., Заславська Л.І. Вища математика. – Дніпропетровськ: НГУ. – 2006. – Ч. II. – 452 с.

38. Глухов О.О. Використання дифрагованих хвиль для прогнозу тектонічних порушень вугільних пластів. – Наукові праці УкрНДМІ НАН України, №15, 2015. – С.79-87.

Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/99572>

39. Головка Ю.М. Спектральне оцінювання широкосмугового шумового сигналу обмеженої тривалості. Математичне моделювання. – Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2023.– 2 (49). – С. 51 – 63

40. Анциферов А.В. Геомеханічний моніторинг геотехнічних систем: монографія / А.В. Анциферов, С.І. Скіпочка, А.О. Яланський та інші. – Донецьк: Вид-во «Ноулідж» (донецьке відділення), 2010. – 253 с.

41. Marcote A., Mavko G. and Prasad M. Dynamic elastic properties of coal - Geophysics, vol. 75, No. 6 (November-December 2010) – P. E227 – E234.

Режим доступу:

[https://www.mines.edu/crusher/wp-content/uploads/sites/126/2018/03/Publication\\_Morcote\\_Coal\\_Geophysics2010.pdf](https://www.mines.edu/crusher/wp-content/uploads/sites/126/2018/03/Publication_Morcote_Coal_Geophysics2010.pdf)

42. Петросян А.Е. Причини виникнення раптових викидів вугілля та газу: Основи теорії раптових викидів вугілля, породи та газу / А.Е. Петросян, Б.М. Іванов. – 1978. – С. 3–61.

43. Петросян А.Е. Теорія раптових викидів / А.Е. Петросян, Б.М. Іванов, В.Г. Крупеня. – 1983. – 210 с.

44. Зиков В.С., Абрамов І.Л. Динамічні явища у вугільних шахтах та їх класифікація. Маркшейдерія та надрокористування. Випуск №4, 2012. – С. 56-60.

45. Зиков В.С., Абрамов І.Л., Торгунаков Д.В. Статистика динамічних явищ у шахтах та уточнення їх класифікації. Гірничий інформаційно-аналітичний бюлетень. Окремий випуск №6, 2013. – С. 297–319.

46. Степанович Г.Я. Газодинамічні явища під час підготовки глибоких горизонтів / Степанович Г.Я., Николин В.І., Лисіков Б.А. – Донецьк: «Донбас», 1970. – 110 с.

47. Большинський М.І., Лисіков Б.А., Каплюхин А.А. Газодинамічні явища у шахтах: монографія. – «Вебер», 2003. – 284 с.

48. Ходот В.В. Раптові викиди вугілля та газу. – 1961. – 363 с.

49. Петухов І.М., Ліньков О.М. Механіка гірничих ударів та викидів. – 1983. – 280 с.
50. Масленніков Е.В. Обґрунтування параметрів прогнозу викидонебезпеки у вугільних шахтах на основі аналізу акустичного сигналу. Дис... канд. техн. наук: 05.15.11. - Дніпропетровськ, 2002.
51. Король В.І. Вдосконалення акустичного способу прогнозу газодинамічних явищ у вугільних шахтах: Дис... канд. техн. наук: 05.15.09. - Дніпропетровськ, 2011.
52. Анциферов М.С. Сейсмоакустичні дослідження у вугільних шахтах / М.С. Анциферов, А.Г. Константинова, Л.Б. Переверзев. – 1960. – 104 с.
53. Работнов Ю.М. Введення в механіку руйнування. – 1987. – 80 с.
54. Іванов В.С., Паршиков Н.В. Сейсмоакустичний метод визначення ефективності захисних заходів щодо боротьби з раптовими викидами вугілля та газу. Зб. «Застосування сейсмоакустичних методів у гірничій справі». – 1964. – С.126-132.
55. Компанец А.І. Виявлення небезпечних зон методом сейсмічної локації із вибою одиночній гірничій виробки. Зб. «Гірничя геофізика». – 1998. – 122 с.
56. Захаров В.М., Мартынюк О.Р. Визначення фізико-механічних властивостей гірських порід при сейсмоакустичному прозвучуванні вуглепородного масиву. Гірн. інф-аналітич. бюл. Випуск 8. – 2000.
57. Мірер С.В., Хмара О.І. Масленніков Е.В. Про контроль викидонебезпечності вибоїв за спектральними характеристиками акустичних сигналів. Питання запобігання раптових викидів. – 1987. – С.52-61.
58. Мірер С.В., Хмара О.І., Масленніков Е.В. Методика та апаратура для акустичного контролю викидонебезпеки вугільних пластів. Питання запобігання раптових викидів. – 1988. – С. 20-24.
59. А.С. 1333853. Мірер С.В., Масленніков Е.В., Хмара О.І. Спосіб акустичного прогноза викидонебезпеки вугільних пластів та пристрій для його здійснення.

60. Алексеев А.Д., Недодаев Н.В., Рязанцев Н.А. Методичні вказівки про застосування способу прогнозу викиднебезпеки гірських порід щодо їх ефективної поверхневої енергії. ДонФТІ. – Донецьк: 1983. – 20 с.
61. Тарасов В.В., Кілін В.О. Навчальний посібник для вузів «Матеріалознавство. Технологія конструкційних матеріалів». – 1983. – 248 с.
62. Панасюк В.В., Андрейків О.Є., Ковчик С.Є. Методи оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів. – Київ: Наукова думка, 1977.
63. Черепанов Г.П. Механіка хрупкого руйнування. – 1974. – 640 с.
64. Чеботарев П.М. Встановлення кореляційних взаємозв'язків в'язкості руйнування вугільного масиву з показниками його міцності. Вісник. Технічні науки. Вип. 9. – 2012.
65. Бреннер В.А., Жабін А.Б., Пушкарьов А.Є., Щеголевський М.М. Гідрострумні технології у промисловості. Гідромеханічне руйнування гірських порід. – 2000. – 343 с.
66. Гринченко В.Т., Мелешко В.В. Гармонійні коливання та хвилі в пружних тілах. – К.: Наукова думка, 1981. – 284 с.
67. Викторов І.А. Фізичні основи застосування ультразвукових хвиль Релея і Лемба в техніці. – 1966. – 168 с.
68. Ямщиков В.С. Хвильові процеси в масиві гірських порід. – 1984. – 272 с.
69. Дубицька М.С. Вдосконалення способу прогнозу диз'юнктивних порушень методом акустичної геолокації при відпрацювання положозалягаючих вугільних пластів. Дис... канд. техн. наук: 05.15.09, 2014.
70. Анциферов А.В. Теорія та практика шахтної сейсморозвідки. Дис... д-ра техн. наук: 05.15.11, 2003.
71. Деглін Б.М. Блиск та убогість прогнозування. Вугілля України. – 2004.– 10 (574).
72. Іванов Д.І. Дисперснозміцнені волокнисті та шаруваті неорганічні композиційні матеріали / Іванов Д.І., Ситніков А.І., Шляпін С.Д. – 2010. – 230 с.
73. Новацкий В. Теория упругости. Пер. з польськ. Победри Б.Є.. Вид-во: Мир. – 1975.

Наукове видання

**Головко** Юрій Миколайович  
**Сдвижкова** Олена Олександрівна  
**Клименко** Діна Володимирівна

**СЕЙСМОАКУСТИЧНИЙ ПРОГНОЗ І ОКРЕМІ ЗАКОНОМІРНОСТІ  
ПРОЯВІВ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ЯВИЩ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ  
ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ**

Монографія

Видано в редакції авторів

Підписано до друку 2024  
Електронний ресурс Обл.-вид. арк..

Підготовлено до друку  
в Національному технічному університеті  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру  
ДК № 1842 від 11.06.2004  
49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19