

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

КЛИМЕНКО Діна Володимирівна



УДК 622.831.32

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

Спеціальність 05.15.09 – «Геотехнічна і гірничча механіка»

**Автореферат дисертації
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі вищої математики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Сдвижкова Олена Олександрівна,
завідувачка кафедри вищої математики
Національного технічного університету
«Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і
науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий
співробітник
Калугіна Надія Олександрівна,
вчений секретар Інституту фізики гірничих процесів
(м. Дніпро) Національної академії наук України;

кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник
Макеєв Сергій Юрійович,
старший науковий співробітник відділу проблем
розробки родовищ на великих глибинах Інституту
геотехнічної механіки імені М.С. Полякова
(м. Дніпро) Національної академії наук України.

Захист дисертації відбудеться «04» липня 2018 року об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.04 при Національному технічному університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. (0562) 47-24-11)

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, тел. (0562) 47-24-11)

Автореферат розісланий «__» червня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



О.В. Солодянкін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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

Найбільш розповсюдженими у даний час є методи прогнозу газодинамічних явищ, що засновані 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 засновані 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.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася в рамках науково-технічної роботи ДБ-2 «Розроблення апаратно-програмного комплексу акустичного сканування неоднорідного породного масиву для підвищення безпеки підземних робіт» (номер державної реєстрації 0116U007674), за якою здобувачка була відповідальним виконавцем.

Метою роботи є підвищення достовірності сейсмоакустичного способу прогнозу раптових газодинамічних явищ в шахтах шляхом формування прогностичних критеріїв на основі умов динамічного руйнування гірської породи.

Ідея роботи 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.

Відповідно до поставленої мети сформульовані та вирішені такі **задачі досліджень**:

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 коливальних 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.
6. Розробка пропозицій щодо вдосконалення методу сейсмоакустичного прогнозу газодинамічних явищ в шахтах і порядку їх використання в апаратурі, що розробляється.

Об'єкт досліджень – вуглепородний масив навколо виробок, в якому поширюються акустичні коливання.

Предмет досліджень – тріщини в породному масиві, що знаходяться в умовах гармонійного навантаження, і спектральні характеристики коливальних, що обумовлені хвильовими процесами навколо виробок.

Методи досліджень. При дослідженні існуючих механізмів і методів розрахунку параметрів процесів руйнування навколо виробок при раптових газодинамічних явищах були застосовані 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 коливальних і напруженого стану на процес розвитку тріщин застосовувалися класичні методи математичного аналізу та чисельні методи рішення трансцендентних рівнянь. Реєстрація акустичних сигналів в шахтних умовах базувалася на п'єзоелектричному способі перетворення механічних коливальних і подальшої дискретизації електричного аналогового сигналу. При спектральному аналізі сигналів застосовувалося 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 застосування в програмно-апаратному комплексі застосовувалися методи теорії ймовірностей і методи розробки алгоритмів.

Основні наукові положення, що захищаються в роботі.

1. Існують такі критичні режими коливального навантаження в породному масиві, що ініціюють одночасний старт тріщин різної довжини, причому для вугілля і порід, що вміщують, з ростом амплітуди складових коливань з частотою 700-1400 Hz критичні довжини тріщин зменшуються в 2-3 рази, що є небезпечним фактором спонтанного руйнування масиву та підставою для удосконалення методики прогнозу газодинамічних явищ.

2. Поточна реєстрація в акустичному сигналі, що генерується в породному масиві, одночасного збільшення в деякому інтервалі часу відносин максимумів амплітуд і площ спектра в високочастотній та низькочастотній областях дозволяє підвищити достовірність ідентифікації небезпечних станів масиву в 1,5-2,1 рази.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному.

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 безпеки виникнення газодинамічного явища, яке пов'язане з процесом руйнування, при зростанні амплітуди високочастотної складової в спектрі коливань, що реєструються.

5. Запропоновано використовувати для оцінки ступеню 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.

Наукове значення роботи полягає у встановленні, що збільшення амплітуди коливань в інтервалі частот 700-1400 Hz для різних гірських порід (дрібнозернистий пісковик, вапняк, кам'яне вугілля) є небезпечним і провокує виникнення газодинамічних явищ, що дозволило розробити схему прогнозу

газодинамічних явищ з урахуванням часового аспекту перевищення показниками критичних значень та зі зниженням помилок першого роду.

Практичне значення роботи полягає:

- в обґрунтуванні схеми прогнозу небезпечного стану масиву, що включає сумісний аналіз двох прогностичних показників та враховує часовий аспект;
- в розробці програмної частини сейсмоакустичного комплексу прогнозу газодинамічних явищ в шахтах.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджують: відповідність розроблених теоретичних положень фундаментальним законам механіки суцільних середовищ, теорії тріщин в пружному середовищі й основам сейсмоакустичного методу; відповідність спектрів сигналів, що зареєстровані в шахтних умовах при роботі видобувних механізмів, результатам теоретично визначеного діапазону частот.

Реалізація результатів роботи. Схема використання двох критеріїв викидонебезпечності вуглепородного масиву, що запропонована в роботі, була використана при розробці апаратно-програмного шахтного сейсмоакустичного комплексу. Комплекс був розроблений в рамках виконання Державного ВНЗ «НГУ» науково-технічної роботи за договором №ДЗ / 151-2016. Дослідний зразок комплексу пройшов у 2017 році попередні випробування в лабораторних і шахтних умовах. Апаратура пройшла апробацію на шахтах «Торецька», «Центральна» ДП «Торецькуголь» та ПАТ «ШУ «Покровське».

Особистий внесок здобувача. Автором самостійно сформульовані мета, ідея, задачі досліджень та наукові положення; досліджена математична модель умови старту тріщини та проведено аналіз чисельних результатів щодо впливу зростання амплітуди коливань частотою 700-1400 Hz на критичну довжину тріщини у різних гірських породах. Теоретично обґрунтована доцільність використання відношення амплітуди високочастотної складової та низькочастотної складової спектра акустичного сигналу як показника критичного стану масиву. Запропоновано новий прогностичний показник, що є відношенням площі ділянки спектра, яка відповідає високочастотним складовим, до загальної площі амплітудно-частотного спектра сигналу. Проведено аналіз експериментальних даних, що отримані в лаві №1086 шахти «Дніпровська». Проаналізовано схему, що включає два прогностичні показники для прогнозу газодинамічних явищ з метою зменшення помилок першого й другого роду, і обґрунтована умова видачі прогнозу «небезпечно».

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи були представлені та обговорені на науково-практичних конференціях: IV Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів» (Житомир, 2017); XVIth International Conference «Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects» (Київ, 2017); Міжнародна науково-технічна конференція «Форум гірників» (Дніпро, 2017).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 8 друкованих працях, з них 5 – у фахових виданнях (у тому числі 2 статті в журналах, що індексуються в наукометричній базі Scopus), 3 – у матеріалах та тезах виступів

на наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, 3 додатків на 3 сторінках, списку використаних джерел, що містить 115 найменувань на 14 сторінках. Містить 150 сторінок машинописного тексту, 59 рисунків, 7 таблиць. Загальний обсяг дисертації становить 184 сторінки.

ОСНОВНОЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовані мета і основні задачі дисертаційної роботи, предмет, об'єкт і методи досліджень, викладені наукова новизна та практична цінність отриманих результатів, представлено наукові положення, які виносяться на захист.

У **першому розділі «Газодинамічні явища в шахтах і методи їх прогнозу. Мета роботи, задачі й методи дослідження»** наводиться огляд класичних і сучасних робіт за видами газодинамічних явищ, причин та механізму їх протікання, розглянуті існуючі на даний момент методи прогнозу газодинамічних явищ і найбільш поширений в даний час сейсмоакустичний метод прогнозу стану вугільних пластів, що схильні до раптових викидів породи й газу. Розглянуто роботи таких відомих дослідників, як Алексеев А.Д., Анциферов М.С., Ніколин В.І., Петросян А.Е., Петухов І.М., Работнов Ю.М., Ходот В.В., Шевельов Г.А., Большинський М.Й., Булат А.Ф., Деглин Б.М., Мірер С.В., Масленніков Є.В., Мінеєв С.П., Лисіков Б.А., Никифоров О.В., Макеєв С.Ю., Калугіна Н.О. та ін. Відзначено, що підвищення точності прогнозу викиднебезпечності вуглепородного масиву для зменшення помилок першого роду можна досягти шляхом більш глибокого й теоретично обґрунтованого аналізу впливу акустичних коливань, що згенеровані видобувними механізмами, на процеси руйнування.

Проаналізовано недоліки сейсмоакустичного методу, визначено мету роботи й здійснено постановку основної та супутніх задач дослідження.

У **другому розділі «Динаміка масиву й прогнозування його стану»** зроблено огляд робіт, в яких розглянуті різні підходи до умов старту (ініціації) тріщин, що є концентратором напружень в масиві. Відзначено залежність між значеннями коефіцієнта тріщиностійкості K_{1C} гірської породи та інтенсивністю напружень в околі вершини тріщини в момент старту тріщини. Відповідно до результатів оглядового матеріалу описаний механізм розвитку тріщини в вуглепородному масиві. Проаналізовано роботи таких фахівців, як Гриффитс А.А., Морозов Н.Ф., Петров Ю.В., Олов'яний А.Г., Панасюк В.В., Порцевський О.К., Катков Г.О., Работнов Ю.М., Черепанов Г.П. та ін. З проведеного аналізу літературних джерел випливає, що важливим теоретичним кроком в бік підвищення надійності методів прогнозу газодинамічних явищ є визначення умов, що сприяють збільшенню розмірів тріщини (моменту старту тріщини).

Третій розділ «Узагальнена умова старту тріщини, що ініційований коливаннями в породному напружено-деформованому середовищі» присвячений дослідженню впливу коливань, що поширюються в гірській

породі, на стан і можливе зростання тріщин, що розташовані у масиві.

У роботі використаний найбільш загальний критерій, який запропонували Н.Ф. Морозов і Ю.В. Петров, на основі просторово-часового підходу до опису руйнування:

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

де $\sigma_1(x,t)$ – головне напруження; σ_{1C} – міцність на розрив; τ – часовий параметр, що характеризує затримку відгуку матеріалу, що руйнується, на розглянутому структурному рівні; d – параметр довжини; x – координата вздовж вісі, що перпендикулярна головному напруженню; t – час; x_0, t_0 – координата точки і момент часу руйнування.

Застосовуючи умову (1) поблизу вершини тріщини, де силове поле однозначно визначається величиною коефіцієнта інтенсивності напруження

$K_1(t)$, $\sigma(x,t) = \frac{K_1(t)}{\sqrt{2\pi x}}$ і, вибираючи формально параметр $d = \frac{2K_{1C}}{\pi \cdot \sigma_{1C}^2}$, де K_{1C} –

критичне значення коефіцієнта інтенсивності напруження K_1 (коефіцієнт тріщиностійкості), отримуємо з критерію (1) умову руйнування у вигляді:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} K(t) dt \geq K_{1C}. \quad (2)$$

Коефіцієнт інтенсивності напруження, який виражений через регулярне головне напруження σ_1 для дискової тріщини з характерним розміром (радіусом) l , має вигляд:

$$K = \frac{2\sigma_1 \cdot \sqrt{l}}{\sqrt{\pi}}.$$

Тоді з (2) умова старту тріщини при даному рівні напружень приймає вигляд:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} \sigma_1(t) dt \geq \frac{\sqrt{\pi} \cdot K_{1C}}{2 \cdot \sqrt{l}}. \quad (3)$$

В даному розділі приділена увага методам визначення тріщиностійкості різних типів порід, узагальнені відомі з літературних джерел статистичні дані щодо кореляційних зв'язків коефіцієнту тріщиностійкості з границею міцності гірських порід на стиск.

Згідно з основною ідеєю роботи напруження, що є нормальним площині тріщини й входить до критеріальної умови (3), в момент старту тріщини представлено в вигляді суми наступних складових:

$$\sigma_1(t) = \sigma_0 + k \cdot (t - t_0) + a \cdot \cos[2\pi \vartheta \cdot (t - t_0) + \varphi_0]. \quad (4)$$

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, ϑ, φ_0 – амплітуда, частота й фаза в момент старту тріщини.

Враховано також, що коефіцієнт інтенсивності напружень сягає максимуму в момент приходу хвилі Релея з протилежної вершини тріщини. На цій основі прийнято, що $\tau = \frac{l}{c_R}$, де c_R – швидкість хвиль Релея в даному середовищі. Підставляючи (4) в (3), після перетворень отримаємо узагальнену умову старту тріщини:

$$\bar{a} \operatorname{sinc}(\pi \bar{l}) \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor) \geq \frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha \bar{l}}{2} - \operatorname{sign}(\sigma_0), \quad (5)$$

де величини

$$\bar{l} = \frac{l \mathcal{G}}{C_R}; \quad \bar{a} = \frac{a}{|\sigma_0|}; \quad \alpha = \frac{k}{|\sigma_0| \mathcal{G}}; \quad K_{cv} = \frac{K_{1c}}{2|\sigma_0|} \sqrt{\frac{\pi \mathcal{G}}{C_R}} \quad (6)$$

є безрозмірними, $\lfloor \bar{l} \rfloor$ – ціла частина \bar{l} , що округлена до найближчого цілого значення в менший бік, $\operatorname{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ – кардинальний синус.

Розв'язок трансцендентного рівняння з (5) дозволив отримати співвідношення між приведеною амплітудою \bar{a} та приведеною довжиною \bar{l} тріщини, що стартує:

$$\bar{a}(\bar{l}) = \frac{\frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha \bar{l}}{2} - \operatorname{sign}(\sigma_0)}{\operatorname{sinc}(\pi \bar{l}) \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor)}, \quad (7)$$

де $\operatorname{sinc}(\pi \bar{l}) \cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor) \neq 0$ і виконується умова $\frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} + \frac{\alpha \bar{l}}{2} - \operatorname{sign}(\sigma_0) \geq 0$.

В окремому випадку, при постійній складовій напруження, тобто при величині $\alpha = 0$, залежність (7) приймає вигляд:

$$\bar{a}(\bar{l}) = \frac{\cos(\pi \lfloor \bar{l} \rfloor)}{\operatorname{sinc}(\pi \bar{l})} \left(\frac{K_{cv}}{\sqrt{\bar{l}}} - 1 \right), \quad (8)$$

де $\bar{l} \neq 1, 2, \dots$ і $0 < \bar{l} \leq K_{cv}^2$.

Співвідношення $\bar{a}(\bar{l})$ між амплітудою коливань та критичною довжиною тріщин, що надано рівнянням (8), представлено графічно для будь-якого значення комплексного параметру K_{cv} , що містить компоненти статичного й гармонійного навантаження, а також тріщиностійкість порід (рис. 1).

З наведеного рисунку 1 видно, що при значенні комплексного параметру $K_{cv} \geq 1$ одним і тим же значенням приведеної амплітуди \bar{a} з деякого інтервалу відповідають точки, що знаходяться на різних гілках графіка функції. Отже, одним і тим же значенням амплітуди коливань \bar{a} можуть відповідати різні значення критичної довжини тріщини \bar{l} , що обумовлюють старт тріщини. В цьому випадку для даної амплітуди як критичну довжину тріщини слід

вибирати найменше значення \bar{l} , і графік шуканої залежності амплітуди від критичної довжини тріщини слід відповідним чином скоригувати.

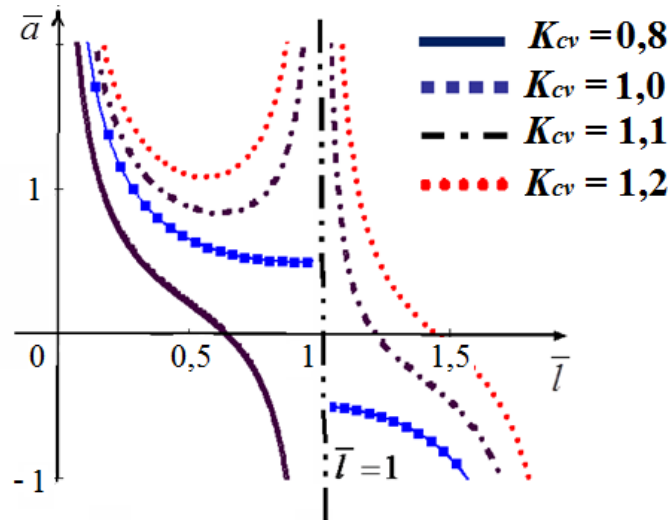


Рис. 1. Співвідношення між приведеними амплітудою коливань \bar{a} та довжиною тріщини \bar{l} при різних значеннях комплексного параметру K_{cv}

Особливий інтерес виявляє ситуація, коли точка, що відповідає шуканої залежності, переходить з однієї гілки на іншу. Тоді при відповідному значенні амплітуди критична довжина тріщини змінюється стрибком. Підставляючи найменше отримане значення \bar{l} в співвідношення (8), отримуємо значення амплітуди a_* , при якому має місце скачок критичної довжини тріщини.

Проведені розрахунки дозволяють побудувати шукану залежність критичної довжини тріщини від амплітуди коливань, що поширюються в масиві, для будь-якого значення комплексного параметру K_{cv} (рис. 2).

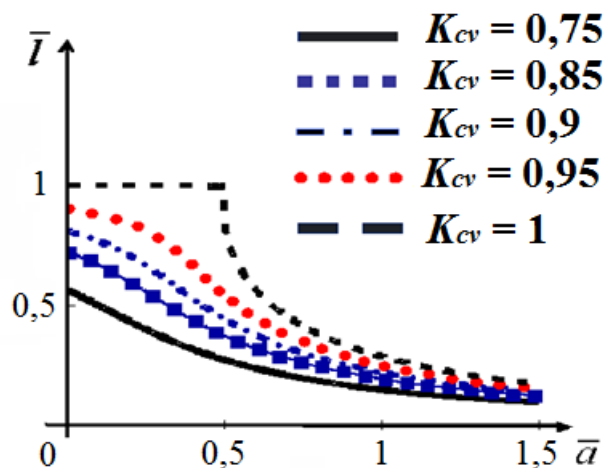


Рис. 2. Залежність критичної довжини тріщини \bar{l} від амплітуди коливань \bar{a} при різних значеннях комплексного параметру K_{cv}

Аналіз показує, що у всіх випадках збільшення амплітуди коливань зменшує довжину тріщин, що знаходяться у критичному стані і готові розвиватися. Для малих значень комплексного показника K_{cv} це зменшення є монотонним. Але при значенні комплексного показника $K_{cv} \geq 1$ зростання амплітуди коливань призводить до стрибкоподібного зменшення критичної довжини тріщин (в 2-3 рази). Використовуючи фізичні характеристики порід (коефіцієнт тріщиностійкості та швидкість поширення хвиль Релея), переходячи від приведених величин амплітуди коливань та довжини тріщин до реальних значень, отримуємо, зокрема, що для дрібнозернистого пісковика зменшення в 2-3 рази довжини критичних тріщин відбувається при двократному збільшенні амплітуд в області частот 900-1200 Hz. Такий же ефект спостерігається для кам'яного вугілля в діапазоні частот 700-1400 Hz.

Така різка зміна довжини тріщини, що починає розвиватися під одночасним впливом статичного навантаження та пружних коливань, розглядається як ознака початку лавиноподібного розкриття тріщин. За умов наявності сорбованого газу, що знаходиться під величезним тиском у закритому просторі вуглепородного масиву, раптове збільшення вільної поверхні за рахунок розкриття тріщин призводить до викидів.

Таким чином, для різних типів гірської породи (дрібнозернистий пісковик, вапняк, кам'яне вугілля) встановлені діапазони частот, де підвищення амплітуди коливань є «небезпечним» з точки зору виникнення газодинамічних явищ. Цей аналітично доведений факт підтверджують експериментальні спостереження в шахтних умовах, що здійснили раніше С.В. Мірер і Є.В. Масленніков.

Дослідження з урахуванням можливої зміни квазістатичної складової напруження у часі (величина $\alpha \neq 0$ в умові (5) старту тріщини) показують, що діапазон критичних довжин тріщин в цьому випадку збільшується в 3 рази в порівнянні з випадком дії лише статичного навантаження. Стрибкоподібна зміна цих довжин також реалізується в діапазоні високих частот 700-1400 Hz (рис. 3).

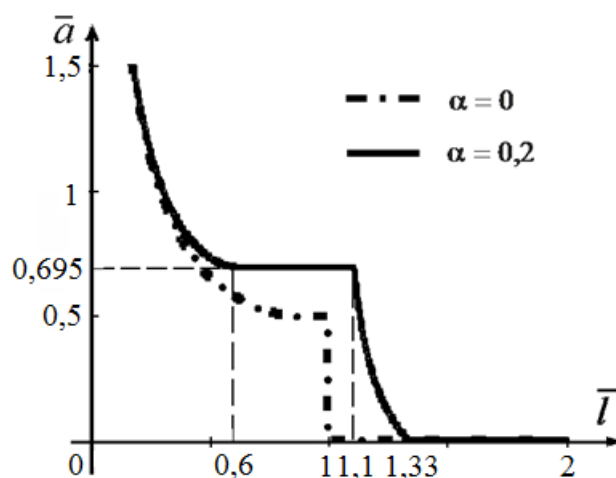


Рис. 3. Співвідношення між приведеною амплітудою коливань \bar{a} та приведеною довжиною тріщини \bar{l} при постійному напруженні ($\alpha = 0$) і з урахуванням зміни квазістатичної компоненти напруження ($\alpha = 0,2$)

Таким чином, аналіз впливу частоти коливань на можливе зростання тріщин дозволив інтерпретувати небезпеку збільшення амплітуди коливань в зазначеному інтервалі частот для конкретної гірської породи (дрібнозернистий пісковик, вапняк, кам'яне вугілля) й розглядати цей факт як передвісник виникнення газодинамічного явища.

У четвертому розділі «Джерела хвильового руху в породному масиві. Реєстрація, обробка і аналіз складових акустичних сигналів, що відповідальні за ініціювання розвитку газодинамічних явищ» проаналізовано різні види хвильових процесів. Зазначено, що важливо визначити, 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 в частотній області, що найбільш важливо з огляду на результати, що викладені в розділі 3.

Наведено дані двох видів експериментальних сейсмоакустичних досліджень. По-перше, проаналізовано акустичні сигнали, що виникають у вугільному пласті при роботі різних руйнівних механізмів. Для характеристики частотного складу вимірюваного сигналу використано спектральний аналіз. На рисунках 4-7 показані амплітудні спектри сигналів, джерелами яких є шум працюючого обладнання: бурильної установки, відбійного молотку, видобувного комбайну й стругової установки відповідно. Результати аналізу показують, що коливання з встановленими «небезпечними» частотами 700-1400 Hz дійсно виникають в породному масиві при роботі машин і агрегатів, що зазвичай використовуються в шахтних умовах.

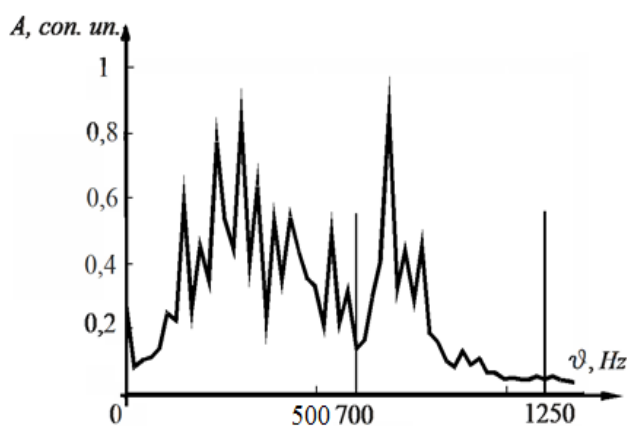


Рис. 4. Спектр сигналу «буріння по породі», тривалість сигналу $t = 4,36$ с

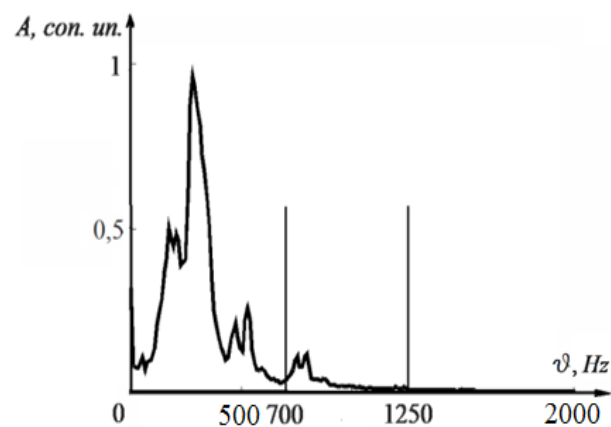


Рис. 5. Спектр сигналу «робота комбайну», тривалість сигналу $t = 7,38$ с

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

Дослідження при цьому проводилися в 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. Ширина виїмкового стовпа складала 287 м.

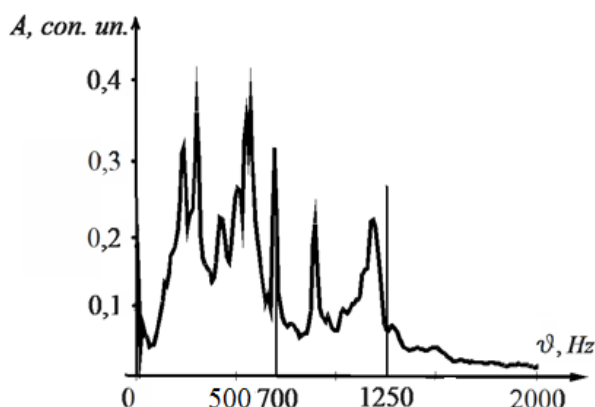


Рис. 6. Спектр сигналу «робота відбійного молотка», тривалість сигналу $t = 4,74$ с

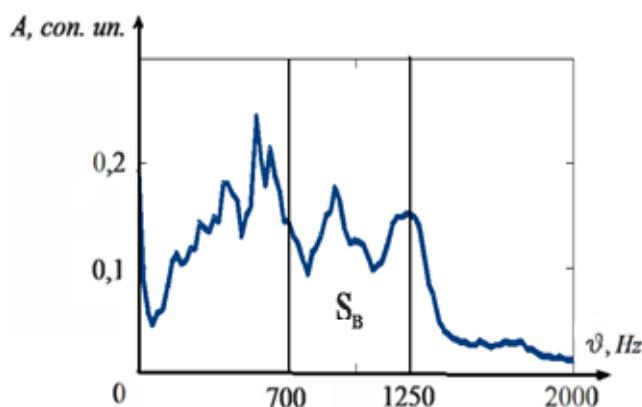


Рис. 7. Спектр сигналу «робота стругової установки», тривалість сигналу $t = 6$ с

Відповідно найкоротша відстань між джерелом вибухової речовини (ВР) і приймачем коливань (геофон №1) складає $L = 284$ м. Відстань від джерела коливань до реєстратора моменту вибуху (геофон №2) складала $l = 3,16$ м. Вибух ВР ініціював хвильовий імпульс, геофон №2 фіксував момент виходу збурення в породне середовище, а геофон №1 реєстрував коливання, які викликані хвилями, що пройшли через всю довжину вугільного стовпа.

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 й точкою прийому коливань (найкоротша відстань $L = 284$ м) більш високі частоти обумовлені бічними хвилями стиску і зсуву.

Оскільки параметри таких хвиль визначаються станом контакту між вугіллям і породами, що вміщують, то саме зміна параметрів спектра на високих частотах свідчить про зміни напруженого стану даної області породного масиву.

Таким чином, експериментально підтверджені теоретичні висновки, що сформульовані у розділі 3: зростання амплітуди саме високочастотних складових в акустичному сигналі, що реєструється, є індикатором небезпечного стану вуглепородного масиву.

У п'ятому розділі «Обґрунтування прогностичного показника і його застосування в апаратно-програмному комплексі для прогнозу газодинамічних явищ в шахтних умовах» закономірності, що отримані при дослідженні умов старту тріщини в попередньо напружено-деформованому породному масиві (розділ 3) і спектральному аналізі експериментальних даних (розділ 4), використані для вдосконалення методики прогнозу ГДЯ при розробці нового програмно-апаратного сейсмоакустичного комплексу.

В апаратурі АК-1, АК-1м, АПСС, що існує на даний момент, використовують показник небезпечного стану $K_B = \frac{A_B}{A_H}$, де A_B , A_H є амплітуди високочастотної та низькочастотної складових спектру акустичного сигналу відповідно. Цей прогностичний показник введений С.В. Мірером і Є.В. Масленніковим на основі емпіричних даних про викиди вугілля і газу. Якщо в процесі ведення прогнозу реєструється значення показника $K_B > K_B^*$, то апаратура видає прогноз «небезпечно». Тут K_B^* - критичне значення показника, що встановлюється експериментально для кожного варіанту гірничо-геологічних умов відпрацювання вугільних пластів.

У розділі 3 теоретично обґрунтована правомірність цього прогностичного показника, оскільки показано, що зростання саме амплітуди коливань в області високих частот (частоти більше 700 Hz) може призвести до раптового старту тріщин, що є ознакою динамічного руйнування масиву.

На основі встановлених закономірностей запропоновано також використовувати для оцінки небезпечного стану масиву додатковий прогностичний показник K_S що є відношенням площі S_B ділянки спектру, яка відповідає високочастотній складовій, до загальної площі S амплітудно-частотного спектра сигналу:

$$K_S = \frac{S_B}{S}. \quad (9)$$

Очевидно, що зміни значень даного показника знаходяться в діапазоні від 0 до 1. Критичне значення K_S^* встановлюється на підставі спостережень значень прогностичного показника в безпечній зоні, що визначається іншими методами поточного прогнозу. Слід зазначити, що при прогнозуванні газодинамічних явищ виконання критеріального співвідношення 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. Необхідно визначати проміжок часу ΔT , протягом якого прогностичний показник приймає порогові значення.

В даному розділі розроблено ймовірнісну модель сумісного використання двох зазначених вище прогностичних показників з урахуванням перевищення ними критичних значень у визначеному часовому інтервалі ΔT . Проаналізовано два ймовірнісних сценарію сумісного включення двох показників K_B і K_S в схему прогнозу викиднебезпечності. В результаті обрано схему і обґрунтовано умову видачі прогнозу «небезпечно» у вигляді:

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

де K_B^* , K_S^* – критичні значення показників K_B , K_S відповідно; t_0 , t_1 – будь-які моменти часу з інтервалу спостереження; ΔT – максимальне допустиме значення часового інтервалу перевищення показниками критичних значень.

Така схема прогнозу газодинамічних явищ забезпечує зменшення помилок першого роду («хибне спрацювання»), без зростання помилок другого роду («пропуск події»). Проведено кількісну оцінку отриманих результатів щодо зменшення ймовірностей помилок першого роду за прийнятою схемою використання двох критеріїв викидонебезпечності. Показано, що введення до схеми прогнозу газодинамічних явищ двох прогностичних показників з урахуванням перевищення ними критичних значень в певному часовому інтервалі, дозволяє знизити помилки першого роду приблизно у 1,5-2,1 рази й, таким чином, підвищити достовірність ідентифікації небезпечних станів масиву.

Запропоновані умови формування прогнозу газодинамічних явищ використані при розробці шахтного сейсмоакустичного комплексу, склад і функціональні частини якого описані й проілюстровані в цьому розділі. Комплекс складається з апаратної та програмної частин (рис. 8).

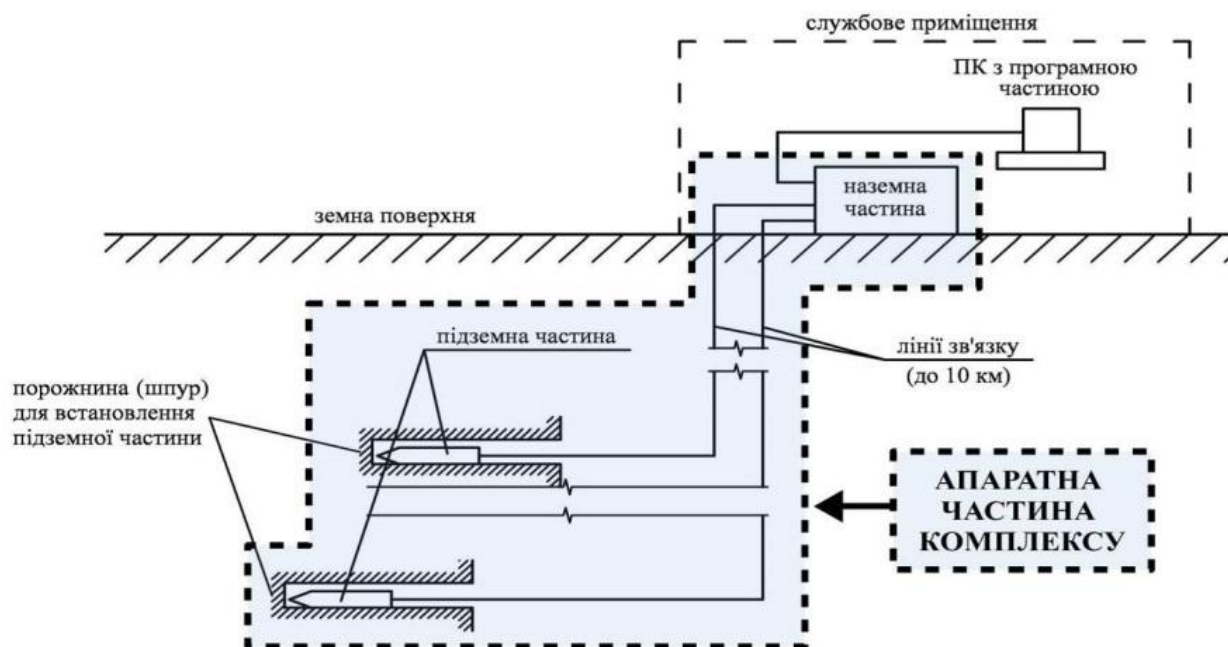


Рис. 8. Схема функціональних частин програмно-апаратного комплексу

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій на основі вперше встановлених закономірностей впливу коливального навантаження на стан тріщин у напруженому вуглепородному масиві й зв'язку характеристик акустичного сигналу, що генерується у масиві, зі схильністю порід до раптового руйнування, вирішене актуальне науково-технічне завдання вдосконалення методу прогнозу газодинамічних явищ у вугільних шахтах, що підвищує ефективність та безпеку праці гірничих робіт.

Основні наукові й практичні результати роботи полягають в наступному.

1. Виведена узагальнена умова старту (ініціації) тріщини при гармонійному навантаженні, яка заснована на просторово-часовому підході до опису

руйнування. Критеріальне співвідношення пов'язує довжину тріщини, квазістатичне напруження, амплітуду й частоту коливань в масиві, а також фізико-механічні характеристики порід: коефіцієнт тріщиностійкості, швидкість поширення хвиль Релея.

2. Досліджено узагальнену умову старту тріщини при зміні параметрів, що входять в нього. Встановлено, що існують такі режими навантаження, при яких критична довжина тріщини змінюється стрибком. Визначено параметри, при яких цей стрибок можливий. Зокрема, 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.

3. Визначено області зміни значень довжини тріщини l і величини зміни квазістатичного напруження α , при яких старт тріщини може бути обумовлений гармонійним навантаженням. Встановлено, що при зростанні квазістатичних напружень збільшення амплітуди коливального навантаження може призвести до одночасного старту тріщин довжиною від l до $3l$. Визначено значення параметрів, при яких даний ефект спостерігається для пісковика і вапняку.

4. За результатами аналізу в умовах шахти «Дніпровська» визначено зв'язок структури сигналів, що зареєстровані, з кінематичними й спектральними характеристиками різних видів хвиль. Зокрема, встановлено, що на розглянутих відстанях між точкою збудження й точкою прийому коливань, більш високі частоти обумовлені бічними хвилями стиснення та зсуву, що свідчить про зміни напруженого стану даної області породного масиву.

5. Доведено, що збільшення амплітуди коливань в інтервалі частот 700-1400 Hz для різних гірських порід (дрібнозернистий пісковик, вапняк, кам'яне вугілля) є небезпечною й провокує виникнення газодинамічних явищ. На цій основі обґрунтована правомірність критерію, що вже використовується в сейсмоакустичній апаратурі та запропоновано новий прогностичний показник небезпечного стану вуглепородного масиву, який є відношенням площі ділянки спектра, що відповідає високочастотним складовим, до загальної площі амплітудно-частотного спектра сигналу.

6. Розроблена ймовірнісна модель сумісного використання двох прогностичних показників, на основі якої обґрунтована схема прогнозу динамічних явищ з урахуванням перевищення запропонованими показниками критичних значень в певному часовому інтервалі, що дозволяє підвищити достовірність ідентифікації небезпечних станів масиву, знижуючи помилки першого роду («хибне спрацювання») у 1,5-2,1 рази без зростання помилок другого роду («пропуск події»).

7. Запропоновану умову прогнозу газодинамічних явищ застосовано в розробленому апаратно-програмному шахтному сейсмоакустичному комплексі. Комплекс пройшов апробацію на шахтах «Торецька», «Центральна» ДП «Торецьквугілля» та ПАТ «ШУ Покровське».

Основні положення й результати дисертації опубліковані в роботах:

1. Клименко Д.В. Геоакустичний прогноз дрібноамплітудної тектоніки вуглепородного масиву при обробці вугільних пластів струговими комплексами / Дубицька М.С., Клименко Д.В. // Вісник Криворізького національного університету. – 2015. – № 39. – С. 34-38. (Міжнародна база даних Index Copernicus).

2. Klymenko D. Studying a crack initiation in terms of elastic oscillations in stress strain rock mass / Sdvyzhkova O., Golovko Yu., Dubytska M., Klymenko D. // Mining of Mineral Deposits. – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 72-77.

3. Клименко Д.В. Узагальнена умова страгування тріщини, що ініційоване коливаннями в породному напружено-деформованому середовищі / Сдвижкова О.О., Головка Ю.М., Клименко Д.В. // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2017. – № 1 (102). – С. 41-49. (Міжнародна база даних Index Copernicus).

4. Клименко Д.В. Effect of harmonic oscillations on a crack initiation in the rock mass / Сдвижкова О.О., Головка Ю.М., Клименко Д.В. // Науковий вісник НГУ. – 2017. – № 4 (160). – С.13-18. (Наукометрична база Scopus).

5. Клименко Д.В. Визначення параметрів коливального навантаження, що ініціює старт тріщин у породному масиві. // Геотехнічна механіка. – 2016. – №128. – С. 192-204.

6. Клименко Д.В. Область параметрів коливального навантаження, що викликає старт тріщини у породному масиві. // Перспективи розвитку гірничої справи та раціонального використання природних ресурсів: матеріали IV Всеукраїнської наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених. – Житомир: ЖДТУ, 2017. – 3 с.

7. Клименко Д.В. Theoretical substantiation of the rock outburst criterion in terms of amplitude-frequency characteristics of an acoustic signal / Головка Ю.М., Сдвижкова О.О., Клименко Д.В. // Geoinformatics: Proceedings of the 16th International conference. – Київ: КНУ ім. Т. Шевченко, 2017. – 5 с. (Наукометрична база Scopus).

8. Клименко Д.В. Стрибкоподібна зміна довжини критичної тріщини при коливальному впливі як фактор виникнення динамічного явища / Головка Ю.М., Сдвижкова О.О., Клименко Д.В. // Форум гірників: матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. Дніпро: ДВНЗ «НГУ», 2017. – С. 135-144.

Особистий внесок автора в роботах, що написані у співавторстві:

[1] – аналіз шахтних досліджень поширення акустичних коливань (експерименти по зондуванню целіку невідпрацьованої частини лави № 165 шахти «Степова» ПАО «ДТЕК Павлоградвугілля») у вуглепородному масиві з геологічними порушеннями при використанні різних способів генерації акустичного сигналу; [2, 3, 4, 7] – дослідження узагальненої умови старту тріщин, аналіз отриманих результатів і чисельні оцінки амплітуди, критичних довжин тріщин, напруження й частоти деякої області вуглепородного масиву; [8] – пропозиція щодо схеми використання двох прогностичних показників з метою підвищення достовірності прогнозу виникнення газодинамічних явищ.

АНОТАЦІЯ

Клименко Д.В. Закономірності проявів і сейсмоакустичний прогноз газодинамічних явищ при відпрацюванні вугільних пластів. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.09 – «Геотехнічна і гірнична механіка». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Дніпро, 2018.

Існуючі методи прогнозу газодинамічних явищ розрізняються за способами отримання інформаційних параметрів і методами їх обробки. Широко застосовуються методи, що засновані на аналізі акустичних сигналів, які генеруються в масиві породоруйнуючими механізмами. Значною перевагою цих методів є безперервність процесу моніторингу та оперативність оцінки стану гірського масиву навколо виробок. Разом з тим прийняті критерії викидонебезпечності не можуть розглядатися як досить обґрунтовані, базуючись виключно на результатах експериментальних спостережень. Ця обставина є однією з причин високого рівня помилок першого роду («хибне спрацювання») при використанні даного методу прогнозу.

Подальший розвиток методу вимагає одночасно розробки нової шахтної апаратури передачі сейсмоакустичного сигналу (замість морально застарілих АПСС-1, АК-1, АК-1м) і застосування обґрунтованих як теоретично, так і експериментально критеріїв прогнозу. У даній роботі аналітично підтверджено факт, що діапазон частот 700-1400 Hz гармонійних коливань є «небезпечним» з точки зору виникнення газодинамічних явищ. Проведено оцінку спектрів акустичних сигналів, що виникають у вугільному пласті при роботі різних шахтних механізмів. Встановлено, що у всіх випадках спектри сигналів, що реєструються, містять складові з частотами «небезпечного» інтервалу 700-1400 Hz. На основі виявлених закономірностей сформульовані критеріальні співвідношення можливого виникнення газодинамічних явищ. Запропоновані критерії були застосовані при розробці апаратно-програмного шахтного сейсмоакустичного комплексу.

Ключові слова: гармонійні коливання, частота, амплітуда, спектр сигналу, старт тріщини, прогностичний показник викидонебезпечності.

АННОТАЦИЯ

Клименко Д.В. Закономерности проявлений и сейсмоакустический прогноз газодинамических явлений при отработке угольных пластов. – Квалификационная работа на правах рукописи.

Диссертация на получение ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика». – Национальный технический университет «Днепровская политехника». Днепр, 2018.

Целью работы является повышение достоверности сейсмоакустического способа прогноза внезапных газодинамических явлений в шахтах путем формирования прогностических критериев на основе условий динамического разрушения горной породы.

В настоящее время разработано несколько методов прогноза газодинамических явлений, различающихся по способам получения информационных параметров и методам их обработки. Широко применяются методы прогноза газодинамических явлений, основанные на анализе акустических сигналов, генерируемых в массиве породоразрушающими механизмами. Существенным достоинством этих методов является непрерывность процесса мониторинга и оперативность оценки состояния горного массива в окрестности выработок. Вместе с тем используемые критерии выбороопасности не могут рассматриваться как достаточно обоснованные, базируясь, почти исключительно, на результатах экспериментальных наблюдений. Данное обстоятельство является одной из причин высокого уровня ошибок первого рода («ложное срабатывание») при использовании данного метода прогноза.

Дальнейшее развитие метода требует одновременно разработки новой шахтной аппаратуры передачи сейсмоакустического сигнала (вместо существующих на данный момент морально устаревших АПСС-1, АК-1, АК-1м) и применения обоснованных как теоретически, так и экспериментально методов прогноза.

В данной работе аналитически подтвержден факт, что диапазон частот 700-1400 Hz гармонических колебаний является «опасным» с точки зрения возникновения газодинамических явлений, что установлено экспериментально в шахтных условиях С. Мирером и Е. Масленниковым. Проведена оценка спектров акустических сигналов, возникающих в угольном пласте при работе различных шахтных механизмов. Установлено, что во всех случаях спектры регистрируемых сигналов содержат составляющие с частотами «опасного» интервала 700-1400 Hz . На основе выявленных закономерностей сформулированы критериальные соотношения возможного возникновения газодинамических явлений. Предложенные критерии были применены при разработке аппаратно-программного шахтного сейсмоакустического комплекса.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем.

1. Впервые разработана и исследована математическая модель старта трещины в углепородном массиве под действием квазистатических напряжений и гармонической нагрузки, обусловленной распространением упругих колебаний в углепородном массиве.
2. Впервые получена зависимость критической длины трещины от величины действующего статического напряжения, амплитуды и частоты гармонических колебаний, трещиностойкости пород и скорости распространения волн Рэлея в данной среде.
3. На основе разработанного условия старта трещины впервые установлено, что при наличии колебательной составляющей существуют такие режимы нагружения, при которых критическая длина стартовой трещины, меняется скачком. Определены параметры, при которых этот скачок возможен. Для различных типов пород (мелкозернистый песчаник, известняк каменный уголь) установлены диапазоны частот (от 700 до 1400 Hz), в которых двукратное

увеличение амплитуды колебаний обуславливает уменьшение критической длины трещины в 2-3 раза.

4. Получено объяснение повышения опасности возникновения газодинамического явления при росте амплитуды высокочастотной составляющей в спектре регистрируемых колебаний, связанное с процессом разрушения.

5. Предложено использовать в качестве контроля состояния углепородного массива (оценки степени опасности) новый прогностический показатель, который представляет собой отношение площади участка спектра, соответствующей высокочастотным составляющим колебаний, к общей площади амплитудно-частотного спектра сигнала

6. Предложена схема с двумя прогностическими показателями для прогноза газодинамических явлений, обеспечивающая уменьшение ошибок первого рода («ложное срабатывание») и второго рода («пропуск события»), с учетом временного интервала превышения данными показателями критических значений.

Практическое значение работы состоит в следующем: предложена схема с двумя прогностическими показателями для прогноза газодинамических явлений с учетом временного аспекта, позволяющая повысить достоверность идентификации опасных состояний массива, снижая ошибки первого рода («ложное срабатывание») в 1,5-2,1 раза, без роста ошибок второго рода («пропуск события»). Данная схема прогноза газодинамических явлений применена в разработанном аппаратно-программном шахтном сейсмоакустическом комплексе.

Ключевые слова: гармонические колебания, частота, амплитуда, спектр сигнала, старт трещины, прогностический показатель выбросоопасности.

ABSTRACT

Klymenko D.V. Outburst regularities and the seismoacoustic forecast at coal seam mining. - Qualification work as a manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.15.09 – «Geotechnical and geomechanics». – National Technical University "Dneprovskaya Polytechnica". Dnepr, 2018.

At the present time, several methods for the outburst predict have been developed. These methods are distinguished on the ways of obtaining information parameters and methods of their processing. Widely used methods for the gas-dynamic phenomena predict are based on the analysis of acoustic signals generated by the rock-fracturing working mechanisms in the mining area. A significant advantage of these methods is the continuity of the monitoring process and the efficiency of assessing the rock state in the excavation areas. However the used outburst hazard criteria are based on experimental observations. Therefore, it would not be regarded as sufficiently substantiated. Apparently, this fact is one of the reasons for the high level of errors of the first kind when using this prediction method.

Further development of the method requires the design of new mining equipment for the transmission of the seismoacoustic signal (instead of the outdated APSS-1, AK-1 and AK-1m) and the use of theoretically and experimentally valid forecast methods.

In this thesis, the fact that the 700-1400 *Hz* frequency range of harmonic oscillations is "hazard" from the point of view of the outburst onset is analytically confirmed. This thing was established experimentally by S. Mirer and E. Maslennikov in situ. The acoustic signals spectra that occur in a coal seam during the operation of various mine mechanisms were assessed. It is proved that in all cases the spectra of the recorded signals contain components with frequencies of the "hazard" range 700-1400 *Hz*. Criteria of the gas-dynamic phenomena onset on the basis of the revealed regularities are formulated. The proposed criteria were applied in the development of the hardware and software mine seismoacoustic complex.

Key words: harmonic oscillations, frequency, amplitude, signal spectrum, crack initiation, outburst hazard prognostic index.