

УДК 622.831.31:622.834

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.251022.89.896

ІДЕНТИФІКАЦІЯ РИЗИКІВ ВТРАТИ СТІЙКОСТІ ГЕОТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ ЗА ГЕОМЕХАНІЧНИМИ ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНИМИ ЧИННИКАМИ

СЛАЩОВ І. М.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,
БЄЛІКОВ А. С.², докт. техн. наук, проф.,
СЛАЩОВА О. А.³, канд. техн. наук, с. н. с.,
КУЛЬБАЧ А. А.⁴, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: IMSlashchov@nas.gov.ua, ORCID ID: 0000-0002-2432-9092

² Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

³ Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова Національної академії наук України, вул. Сімферопольська, 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁴ Кафедра безпеки життєдіяльності, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-57, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5571-791X

Анотація. *Постановка проблеми.* Найбільш небезпечно з гірничих технологій – це спорудження виробок підземним способом та їх підтримання в робочому стані. Виникають некеровані деформації породного масиву, раптові вивали порід, руйнування кріплення та завали виробок. Травматизм персоналу від цих факторів ризику, які безпосередньо пов'язані з геомеханічними процесами, досягає половини від загального числа постраждалих. Тому завдання ідентифікації ризиків втрати стійкості геотехнічної системи за геомеханічним чинником з урахуванням водонасичення порід (фактора, що істотно впливає на властивості міцності порід) стало актуальним і служить фундаментом для розроблення ефективних і безпечних технологій гірничих робіт. **Мета роботи** – обґрунтувати методи ідентифікації ризиків втрати стійкості підземних виробок за геомеханічними та гідрогеологічними чинниками в умовах гірничих виробництв. **Результати.** Потенційний ризик виникнення аварійної ситуації для кожного з елементів геотехнічної системи запропоновано визначати: за значеннями параметрів у поточний момент часу, а також за амплітудою відхилення та за швидкістю відхилення параметрів від точки рівноваги за попередній проміжок часу. Для прогнозу напружено-деформованого стану гірських порід вдосконалено методи реалізації геомеханічних моделей, оцінення ризиків і сценаріїв розвитку ситуацій. На базі моніторингу деформацій порід встановлено ризики втрати стійкості кріплення лави внаслідок обвалення покрівлі. Для ідентифікації ризиків, що виникають через вплив фактора обводнення масиву гірських порід на їх міцність, а, відповідно, і на стійкість гірничих виробок, досліджено зразки порід. Встановлено, що при обводненні ризики лінійно зростають з інтенсивністю 0,62...0,71 – для аргілітів, 0,49...0,58 – для алевролітів, 0,25...0,37 – для пісковиків у діапазоні глибин 400...800 м. Для автоматизованих систем безпеки запропоновано ці параметри обробляти методами нечіткої логіки. **Наукова новизна.** Подальший розвиток отримав метод ідентифікації ризиків втрати стійкості геотехнічної системи, що відрізняється: визначенням закономірностей змін показників ризиків виникнення небезпечного стану контрольованого об'єкта за статистично значущою кількістю геомеханічних і гідрогеологічних параметрів моніторингу попередніх подій або за трендами і прогнозами подальших подій, залученням моделей нечіткої логіки, які враховують відхилення параметрів кожного з елементів геотехнічної системи і швидкості зміни цих відхилень за проміжок часу. **Висновок.** Отримані залежності визначають вхідні умови для ідентифікації стійкості обводненого породного масиву та створення технологій підтримання гірничих виробок. Дослідження дозволили відповісти на низку раніше не вирішених питань, що пов'язані з ризиками втрати стійкості гірничих виробок, забезпечити більш високу ефективність і безпеку ведення гірничих робіт.

Ключові слова: ідентифікація ризиків; стійкість виробок; геотехнічна система; моделювання; моніторинг; безпека гірничих робіт

RISKS IDENTIFICATION OF THE GEOTECHNICAL SYSTEM STABILITY LOSS DUE TO GEOMECHANICAL AND HYDROGEOLOGICAL FACTORS

SLASHCHOV I.M.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

BELIKOV A.S.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

SLASHCHOVA O.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Senior Researcher*,

KULBACH A.A.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: IMSlashchov@nas.gov.ua, ORCID ID: 0000-0002-2432-9092

² Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: belikov@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

³ Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, 2-a, Simferopolska Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 746-01-51, e-mail: gtmigtm@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7161-1410

⁴ Department of Life Safety, Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail: zei83dici@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5571-791X

Abstract. Problem statement. The most dangerous of mining technologies is the construction of workings underground and their maintenance in good condition. Uncontrolled deformations of the rock mass, sudden rock falls, destruction of the lining and blockages of workings are emerged. Personnel injuries from these risk factors, directly related to geomechanical processes, reach half of the total number of victims. Therefore, the issue of risks identifying for geotechnical system stability loss due to geomechanical factor, taking into account the rocks water saturation (a factor that significantly affects the strength properties of rocks) is relevant and serves as the foundation for the development of efficient and safe mining technologies. **The purpose of the article.** To substantiate methods for risks identifying of the underground workings stability loss due to geomechanical and hydrogeological factors for the mining enterprises conditions. **Research results.** The potential risk of an emergency situation for each of the geotechnical system elements is proposed to be determined: by the parameters values at the current time, by the parameters deviation amplitude and by the parameters deviation speed from the equilibrium point during the previous period of time. For forecasting the stress-strain state of rocks, the methods of implementing geomechanical models, assessing risks and scenarios of situation development are improved. On the basis of rock deformations monitoring, the risks of longwall support stability loss due to roof collapse were established. To identify the risks arising from the influence of the rocks flooding factor on their strength, and, accordingly, on the mine workings stability, rock samples were studied. It was found that when rocks are watered, the risks increase linearly with an intensity of 0.62...0.71 for mudstones, 0.49...0.58 for siltstones, 0.25...0.37 for sandstones in the depth range of 400 ... 800 m. For automated safety systems, it is proposed to process these parameters using fuzzy logic methods. **Scientific novelty.** The method for risks identifying of the geotechnical system stability loss has been further developed, which is distinguished by: determining regularities of changes in risk indicators of the controlled object dangerous state by a statistically significant number of geomechanical and hydrogeological parameters of monitoring previous events or by trends and forecasts of further events; using fuzzy logic models that take into account the parameters deviations of each geotechnical system elements and the rate of change for these deviations over a period of time. **Conclusions.** The obtained dependencies determine the input conditions for identifying of the flooded rock massif stability and creating technologies for mine workings support. The investigations made it possible to answer a number of previously unresolved problems associated with the risks of the mine workings stability loss, to ensure higher efficiency and mining operations safety.

Keywords: *risk identification; mine workings stability; geotechnical system; modeling; monitoring; mining safety*

Постановка проблеми. Найбільш небезпечне з гірничих технологій – це спорудження виробок підземним способом та їх підтримання в робочому стані. Гірничі виробки підтримують протягом усього строку експлуатації шахти або підземної споруди. В особливо небезпечних умовах реалізують технології анкерного кріплення та повторного використання виробок [1; 2]. Висока небезпека пов'язана з об'єктивними

геомеханічними факторами, оскільки роботи здійснюють в умовах структурно-неоднорідних, слабких і водонасичених порід. Виникають некеровані деформації породного масиву, раптові вивали порід, руйнування кріплення та завали виробок, тобто наслідки проявів геомеханічних процесів. При цьому травматизм персоналу від цього фактора ризику досягає половини від загального числа постраждалих [3].

Більше того, травматизм, пов'язаний з геомеханічним фактором, перевищує травматизм за найбільш небезпечним газодинамічним фактором іноді більше ніж у 12 разів (наприклад, у 2007 і 2010 роках). В той же час слід врахувати, що аварійність за газодинамічним фактором теж не можна розглядати окремо від геомеханічного фактора, оскільки геомеханічне руйнування породного масиву становить одну з основних складових у процесах раптових викидів і проривів газу в виробки [4]. Тому завдання ідентифікації ризиків втрати стійкості геотехнічної системи за геомеханічним чинником з урахуванням водонасичення порід (фактора, що істотно впливає на властивості міцності порід) актуальне і служить фундаментом для розроблення ефективних і безпечних технологій гірничих робіт.

Аналіз публікацій. Ідентифікація в концепції теорії ризиків, що стосується потенційно небезпечних процесів на підприємствах, трактується як ототожнення та розпізнавання рівнів небезпечних станів іншої системи, процесу або об'єкта за наперед заданими критеріями, які визначаються в кожному конкретному випадку окремо. Для ідентифікації ризиків, що спричиняють втрату стійкості виробок в умовах гірничих виробництв та призводять до травмування або загибелі персоналу, слід використовувати методи, які базуються на статистично значущій кількості параметрів поточного моніторингу контрольованого об'єкта або закономірностях поведінки породного масиву, що визначені шляхом моніторингу гірничих виробок і прогнозування напружено-деформованого стану гірських порід [5; 6].

Паралельно для зменшення аварійності на гірничих підприємствах потрібно зменшити кількість помилок в керуванні (людський фактор) за допомогою автоматизації. Резерв підвищення ефективності автоматизованих систем керування закладено в переході до інтелектуальних алгоритмів обробки даних, які представлені сукупністю відомостей про властивості об'єкта керування,

закономірностями процесів і явищ, правилами для прийняття рішень [7].

Наразі геоінформаційні технології та системи штучного інтелекту застосовуються в багатьох сферах, пов'язаних з інтерпретацією геологічних даних, з науковими дослідженнями, а також багатьма іншими напрямками. Вони є складовою в структурі сучасних виробничих автоматизованих систем керування [8]. Проте будь-яка найсучасніша цифрова система безпеки потребує обґрунтування математичних моделей, визначення імовірнісних оцінок інформативних параметрів стану породного масиву.

Мета роботи – обґрунтувати метод ідентифікації ризиків втрати стійкості виробок за геомеханічними та гідрогеологічними чинниками в умовах гірничих виробництв.

Результати досліджень.

1. Загальні аспекти ідентифікації ризиків втрати стійкості потенційно-небезпечної геотехнічної системи.

Ідентифікація параметрів стану геотехнічної системи «кріплення–масив порід» здійснюється в процесі експлуатації гірничих виробок і ґрунтується на тому, що геомеханічний стан породного масиву постійно змінюється. Поточні параметри фіксуються персоналом та системами моніторингу, а прогнозовані – визначаються або за результатами числових експериментів на моделях, або за трендами емпіричних залежностей. Ризики виникнення небезпечних станів породного масиву за геомеханічними та гідрогеологічними чинниками будуть відрізнятися для кожного процесу і для кожного фактора, що впливають на ці процеси, тому повинні визначатися окремо.

Для геотехнічної системи потенційний ризик $R(E^t)$ виникнення аварійної ситуації від впливу фактора E^t в момент часу t (ймовірність реалізації несприятливого розвитку подій) необхідно визначати для кожного з елементів цієї системи, де повний ризик являє собою суму індивідуальних ризиків окремих значень домінуючих інформативних параметрів. Запропоновано

аналізувати відхилення параметрів геотехнічної системи від точки рівноваги і швидкості зміни цих відхилень.

Потенційний ризик виникнення аварійної ситуації визначають для кожного з елементів геотехнічної системи:

– за значеннями інформативних параметрів в момент часу t :

$$R(E^t) = k_1^t R(E_1^t) + k_2^t R(E_2^t) + \dots + k_m^t R(E_m^t);$$

– за відхиленнями параметрів від точки рівноваги за проміжок часу Δt :

$$R(E^{\Delta t}) = k_1^{\Delta t} R(E_1^{\Delta t}) + k_2^{\Delta t} R(E_2^{\Delta t}) + \dots + k_n^{\Delta t} R(E_n^{\Delta t});$$

– за швидкістю відхилення параметрів за проміжок часу Δt :

$$R(E^{v(\Delta t)}) = k_1^{v(\Delta t)} R(E_1^{v(\Delta t)}) + \dots + k_k^{v(\Delta t)} R(E_k^{v(\Delta t)}),$$

де $R(E^t)$, $R(E^{\Delta t})$, $R(E^{v(\Delta t)})$ – потенційні ризики виникнення аварійної ситуації в одному з елементів геотехнічної системи, відносна одиниця; $R(E_m^t)$, $R(E_n^{\Delta t})$, $R(E_k^{v(\Delta t)})$ – ризики, визначені за значенням інформативних параметрів в момент часу t ; відхилень і швидкостям відхилень параметрів геотехнічної системи від точки рівноваги для груп з m , n і k факторів, що впливають, відповідно, відн. од.; $k_1^t, k_2^t, \dots, k_m^t; k_1^{\Delta t}, k_2^{\Delta t}, \dots, k_n^{\Delta t}; k_1^{v(\Delta t)}, k_2^{v(\Delta t)}, \dots, k_k^{v(\Delta t)}$ – нормалізовані коефіцієнти впливу на потенційний ризик окремих факторів.

Інтенсивності потоків, що входять і виходять з i -го стану системи, являють собою зміни параметрів контролю за впливу відповідного фактора ризику на стійкість елементів геотехнічної системи.

Геомеханічні чинники очікуваного ризику втрати стійкості гірничої виробки об'єднані шляхом інтеграції імовірнісних оцінок інформативних параметрів стану породного масиву і гірничих виробок. Інтегральний показник визначає ризик втрати стійкості геотехнічної системи за сумою показників окремих груп ризиків:

$$R_{\Sigma}(E^t, E^{\Delta t}, E^{v(\Delta t)}) = k_{\Sigma}^t \sum_1^m k_m^t R(E_m^t) + k_{\Sigma}^{\Delta t} \sum_1^n k_n^{\Delta t} R(E_n^{\Delta t}) + k_{\Sigma}^{v(\Delta t)} \sum_1^k k_k^{v(\Delta t)} R(E_k^{v(\Delta t)}),$$

де $k_{\Sigma}^t, k_{\Sigma}^{\Delta t}, k_{\Sigma}^{v(\Delta t)}$ – коефіцієнти для груп факторів, нормалізовані в діапазоні від 0...1.

Показник використовується для загальної оцінки поточного стану безпеки гірничих виробок. При надходженні сигналу на пульт диспетчера або на вхід автоматизованої системи управління об'єктом подається рекомендація для застосування технічних і технологічних заходів, що сприяють нормалізації роботи геотехнічної системи.

2. Ідентифікація потенційно-небезпечних станів породного масиву на базі моніторингу геомеханічних параметрів

Дослідження ризиків втрати стійкості гірських порід проведені на прикладі умов відпрацювання вугільного пласта h_7 потужністю 0,8...1,1 м. Ведення гірничих робіт ускладнене зниженням міцності і стійкості порід, обводненням, схильністю порід до обвалення.

Управління гірським тиском у лаві здійснюється плавним опусканням (утриманням покрівлі на індивідуальному дерев'яному кріпленні та дерев'яних кострах). Однак, як показав досвід утримання покрівлі, в процесі відпрацювання лави відбувається утворення зони непружних деформацій і збільшення зміщень гірських порід. Це викликає підвищені навантаження на кріплення, деформації стійок і обвалення порід (рис. 1).

Стійки шахтного кріплення в результаті спротиву діючим навантаженням від сил гірського тиску з боку покрівлі перебувають у складному напруженому стані та зазнають деформації стиснення і поперечного вигину. Деревина може витримувати навантаження лише протягом нетривалого часу, а для довготривалих навантажень опір деревини виявляється помітно зниженим. Крім того, властивості сильно змінюються за впливу вологості деревини, яка змінюється у зв'язку з обводненнями виробки, температурою і вологістю навколишнього повітря.

Все це говорить, що величини меж міцності не можуть бути безпосередньо використані для розрахунків дерев'яних стійок шахтного кріплення. Залежно від

низки факторів вони знижуються в кілька разів і для розрахунків застосовуються вже зменшені показники – розрахункового опору або допустимих напружень з урахуванням коефіцієнта запасу (відношення величини межі міцності до величини допустимого напруження).

Для стійок із деревини, у зв'язку з зазначеними особливостями, коефіцієнт запасу встановлюється вищим, ніж для інших матеріалів (наприклад, металу). Залежно від характеру діючого зусилля коефіцієнти запасу коливаються для умов стиснення від трьох до п'яти.



а



б



в



г

Рис. 1. Стан порід покрівлі після відпрацювання вугільного пласта h_7 : а – стан безпосередньої покрівлі в лаві, що відпрацьовується; б, в, г – характер обвалень порід у виробленому просторі раніше відпрацьованої лави

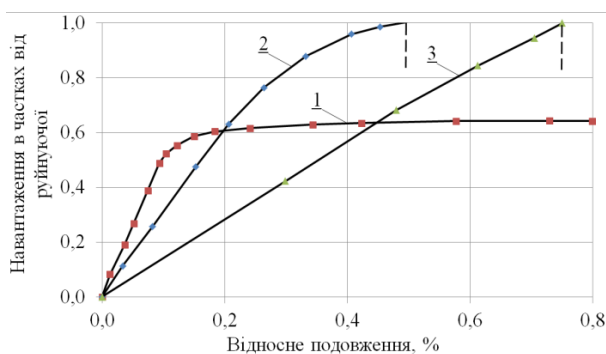


Рис. 2. Залежності деформацій стійок кріплення від навантаження за даними випробувань: 1 – сталь; 2 – сосна (стиснення); 3 – сосна (розтягнення)

Експертні правила для переходу стану об'єкта контролю (в даному випадку системи «кріплення – породний масив») зі стану «безпечно» в стани «увага» і

«небезпечно» визначено за розрахунковими граничними деформаціями дерев'яних шахтних стійок (рис. 2), які в даному випадку застосовуються для керування покрівлею в лаві, з урахуванням коефіцієнта запасу міцності.

Приклад визначення ризиків втрати стійкості гірських порід за фактором обвалення покрівлі за результатами шахтних досліджень і прогнозу процесу опускання гірських порід показано на рисунку 3. На графіках (рис. 3, б, г, е, ж) наведено лінійні залежності змін рівнів ризиків втрати стійкості кріплення лави у часі у верхній, середній і нижній частинах лави (для параметрів прогнозу $R^2 = 0,91 \dots 0,98$).

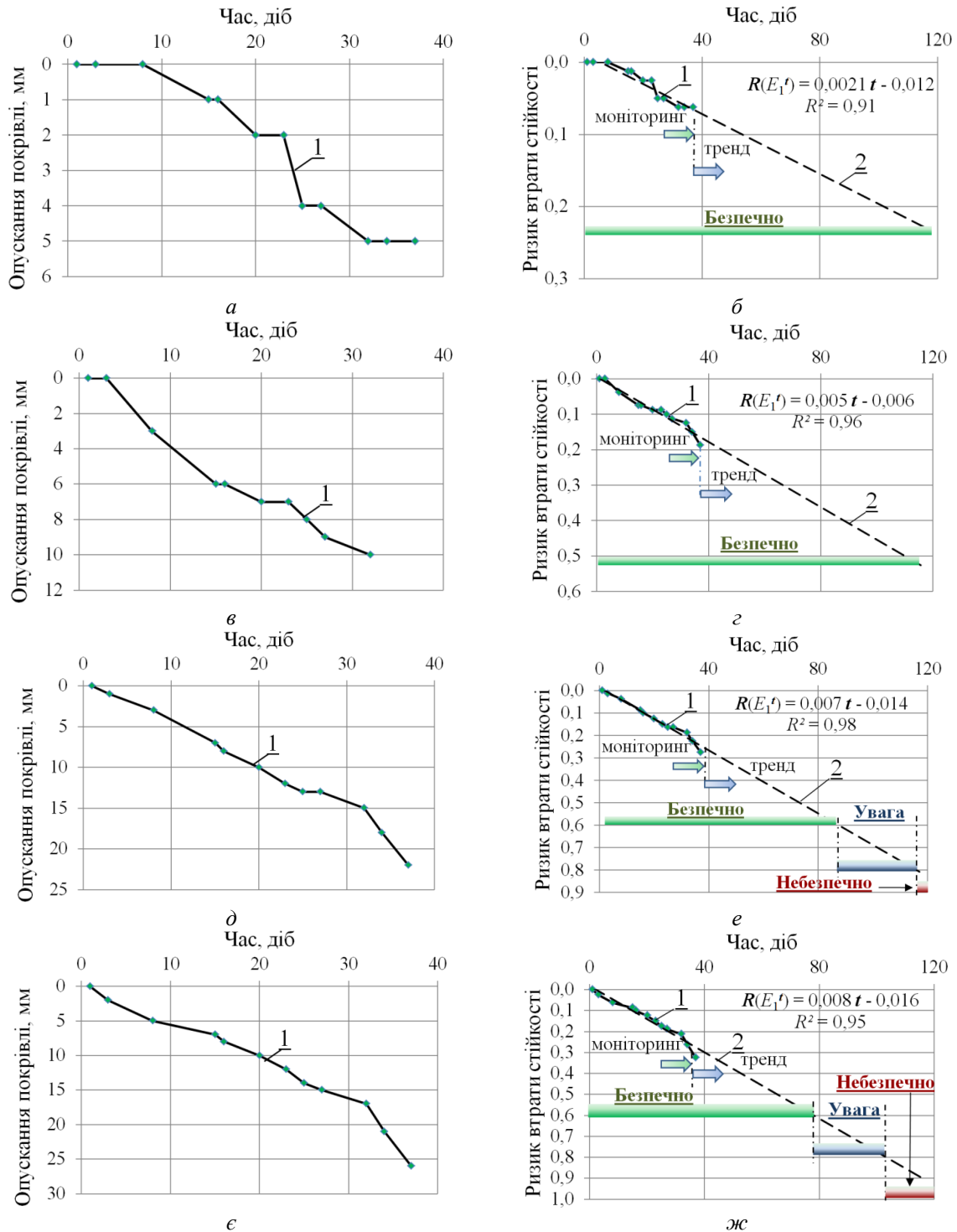


Рис. 3. Ідентифікація ризиків втрати стійкості кріплення лави внаслідок обвалення покрівлі за результатами шахтних досліджень і прогнозу деформації порід у верхній частині лави (а, б), у середній частині лави (в, г – ближче до вентиляційного штрафу; д, з – ближче до відкатного штрафу), у нижній частині лави (ж, з): 1 – дані моніторингу; 2 – прогноз обвалення покрівлі (тренд на 60 діб)

Як видно з рисунків 3, е, ж, ризики втрати стійкості системи «кріплення – масив», що застосовується для даних умов, досягають небезпечних рівнів у нижній частині лави вже на 106-ту добу оголення, що потребує превентивних заходів із

посилення кріплення. Це наочно ілюструється фотографіями стану стійок дерев'яного кріплення в нижній частині лави (рис. 1).

Дослідження дозволили відповісти на низку раніше не вирішених питань,

пов'язаних із ризиками втрати стійкості структурно-неоднорідного масиву порід і гірничих виробок, забезпечити більш високу ефективність і безпеку ведення гірничих робіт внаслідок запобігання обвалень порід покрівлі та мінімізації об'ємів ціликів. Слід зазначити, що встановлені для цих умов закономірності можна поширити і на інші подібні умови.

3. Ідентифікація потенційно-небезпечних станів породного масиву на базі прогнозу напружено-деформованого стану порід

Прогнозування геомеханічних процесів у породному масиві та обґрунтування очікуваних ризиків втрати стійкості гірничих виробок запропоновано виконувати методом математичного моделювання. Для прогнозу напружено-деформованого стану (НДС) гірських порід автори [9; 10] вдосконалили цифрові системи, методи реалізації геомеханічних моделей, оцінки ризиків і сценаріїв розвитку ситуацій. Це дозволило визначати сценарії поширення зон непружних деформацій і змін напружень у породному масиві із застосуванням різних способів кріплення, при збільшенні навантаження на систему «кріплення – масив», змінах умов залягання і обводнювання шарів порід.

Геоінформаційна обчислювальна система GEO-RS[©], адаптована для цих завдань, виконує розрахунки НДС породного масиву і деформування гірничих виробок методом скінченних елементів. Програмний комплекс широко апробований під час моделювання геомеханічних, газодинамічних та технологічних процесів у шахтах. Розроблено методичні рекомендації щодо використання інформаційної системи, які включають основи її функціонування, підготовки і розгортання, а також особливості застосування на гірничорудних підприємствах.

У контексті даних досліджень програмний комплекс використовується як експертна підсистема для прогнозування геомеханічних процесів, що допомагає підвищити безпеку робіт завдяки прийняттю завчасних рішень з підтримання гірничих

виробок у безаварійному стані. При цьому ідентифікація й експертна оцінка стану покрівлі та подошви гірничих виробок засновані на поєднанні числового аналізу НДС гірських порід із методами візуального, інструментального та геофізичного контролю. Такий підхід дозволяє перевірити достовірність обчислень, встановити стадію деформаційного процесу і поєднати об'єктивні дані інструментальних спостережень із даними, отриманими в результаті розрахунку локальних моделей станів порід.

З іншого боку, моделювання аналітичними методами дозволяє отримати ряд поточних і прогнозованих параметрів ідентифікації, які методами натурних досліджень отримати неможливо або вкрай важко. До таких параметрів, перш за все, належать параметри: зон непружних деформацій і розриву суцільності (поширеності, об'ємів, меж, швидкості їх змін, прогнозованих значень); напружень у породному масиві (максимальних головних напружень, швидкості їх змін, прогнозованих показників); зміщень і форм деформацій контуру гірничих виробок (зміщень покрівлі, подошви, боків, швидкості їх зміни, прогнозованих значень).

На прикладі гірничо-геологічних умов шахти «Самарська» виконано експертне оцінення небезпечних станів масиву гірських порід при збільшенні напружень у процесі ведення гірничих робіт. Інформативний параметр для аналізу ризиків і рівнів безпеки – прогнозовані об'єми зруйнованих порід, основний фактор впливу – коефіцієнт концентрації напружень та об'єм зон непружних деформацій (рис. 4.). Параметри розраховані з урахуванням застосовуваних на шахті систем кріплення виробок.

4. Ідентифікація потенційно-небезпечних станів породного масиву за гідрогеологічними факторами.

З метою ідентифікації ризиків, що виникають внаслідок впливу фактора обводнення масиву гірських порід на їх міцність, а, відповідно, і на стійкість

гірничих виробок, систематизовано лабораторні дослідження понад 3 000

зразків аргілітів, алевролітів, пісковиків і вапняків.

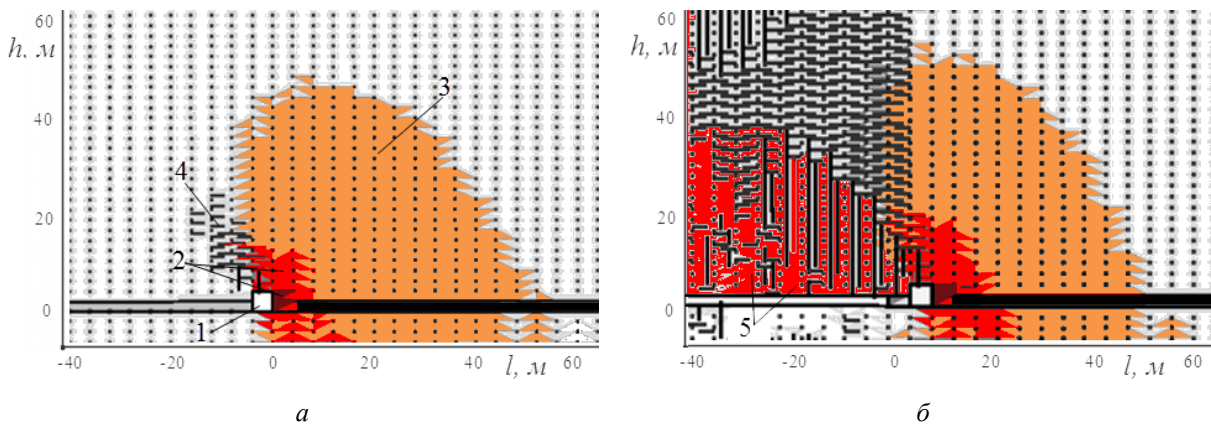


Рис. 4. Ідентифікація ризиків втрати стійкості виробок перед лавою (а) і в зоні обвалення (б) на базі прогнозу НДС породного масиву: 1 – виробка; 2, 3 – зони концентрації напружень у 1,5...2,0 та 2,5 рази; 4 – магістральні тріщини; 5 – обвалення покрівлі

Ймовірність події, якщо ми знаємо, що максимальне обводнення порід уже відбулося, дорівнює одиниці. Тому звичайна міра ризику для окремого класу факторів, наприклад, для фактора зниження міцності обводнених гірських порід (один із наслідків процесу обводнення), визначається тільки наслідками від цього процесу:

$$R(\sigma^w) = P^w k^t (\Delta\sigma_e^{*w}),$$

де P^w – ймовірність обводнення гірських порід, відн. од; k^t – коефіцієнт впливу на потенційний ризик відносного зниження міцності обводнених гірських порід, відн. од.; $\Delta\sigma_e^{*w}$ – відносні зміни міцності при обводненні

$$\Delta\sigma_e^{*w} = 100 \sigma_e^{*w} / \sigma_e^*, \%,$$

де σ_e^* , σ_e^{*w} – межі міцності на стиснення у сухому і водонасиченому стані, Па.

Рівень водонасичення порід приймався рівним нулю для зразків у сухому стані і дорівнював 100 % для зразків порід із максимально можливим рівнем водонасичення зразків (за лабораторного дотримання зразка у воді відповідно зі стандартом), яке досягалося в умовах лабораторних експериментів або в реальному масиві порід. Установлені залежності, які визначають рівні ризиків від зниження міцності обводнених гірських порід, показані на рисунку 5. Рівні ризиків об'єднані в декілька інтервалів з градаціями параметрів

(шириною смуг), які в інформаційних системах безпеки запропоновано обробляти методами нечіткої логіки [11; 12].

Водонасичення порід для всіх інтервалів глибин спричинює зниження їх міцності в 1,5–2,0 рази (для пісковиків і вапняків) і 2,5–3,0 (для алевролітів і аргілітів). Отримані залежності визначають вхідні умови для ідентифікації стійкості обводненого породного масиву та створення ризик-орієнтованих технологій підтримання гірничих виробок.

Як ілюстрацію ризик-орієнтованого підходу до оцінювання стійкості виробки через фактор зниження міцності гірських порід при обводненні на рисунку 6 показано деформації порід підшви виробки за результатами інструментальних досліджень (пласт m_3). Зіставлення отриманих даних при обводненні порід і без обводнення показали, що зміщення підшви збільшуються в часі за лінійними залежностями:

– лінійна модель зміщень підшви виробки при обводненні:

$$u = 0,026 t - 0,08, R^2 = 0,98;$$

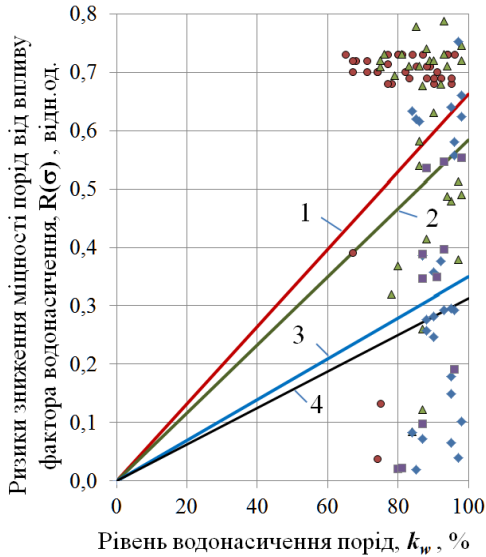
– лінійна модель зміщень підшви виробки в повітряно-сухому стані:

$$u = 0,01t - 0,04, R^2 = 0,95.$$

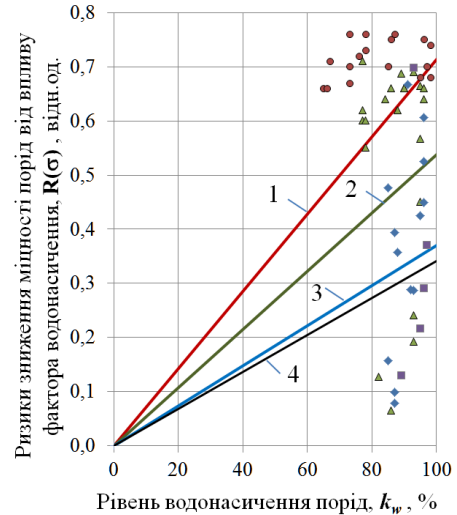
Обводнення порід підшви виробки має максимальний вплив на її стійкість за перші

20 діб (див. рис. 6), що підтверджує дані лабораторних експериментів за тимчасовими характеристиками зниження міцності обводнених порід. Відношення величини здимання у разі попадання води на

підшову виробки до зміщень у сухій виробці за 20 діб збільшується в 1,5...4,5 раза. Потім спостерігалось зниження інтенсивності здимання і після 60 діб відбувається стабілізація процесу.



а



б

Рис. 5. Ідентифікація ризиків зниження міцності від впливу фактора обводнення гірських порід для глибин 400–600 м (а), 600–800 м (б): 1 (●), 2 (▲), 3 (◆), 4 (■) – залежності ризиків для аргілітів, алевролітів, пісковиків і вапняків, відповідно

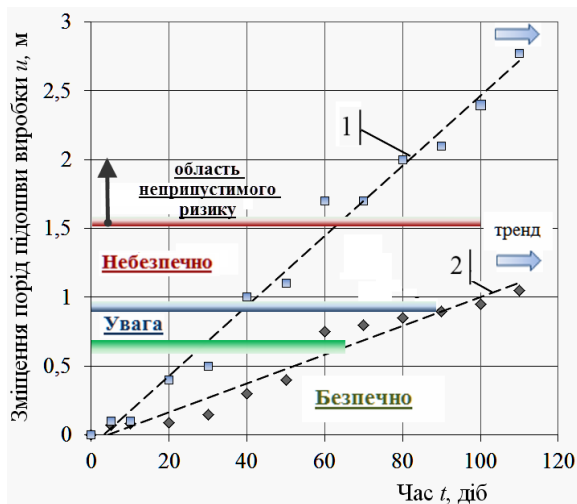


Рис. 6. Зміщення порід підшови гірничої виробки у часі, отримані шахтними експериментами: 1 – в обводненому стані; 2 – в повітряно-сухому стані

Визначення ризиків втрати стійкості гірничої виробки за фактором зсувів її підшови в разі обводнення порід залежить від міцності та складу порід, а також стадії водонасичення (рис. 5). Повне водонасичення (пласт m_3) відбувається через 62 доби, коли ризик втрати стійкості досягає

одиниці (ідентифіковано за даними моніторингу). Область неприпустимого ризику для обводнених порід, де ризик виникнення наслідків дуже великий, знаходиться в тимчасовому інтервалі від 62 діб до кінця терміну підтримання виробки (якщо не вживаються додаткові заходи щодо підвищення стійкості).

У той же час здимання підшови виробки, що перебуває в повітряно-сухому стані, визначена за трендовими значеннями (прогнозом) її зсувів. При цьому втрата стійкості підшови виробки відбувається на 144-ту добу.

Безпечний часовий інтервал (область малого ризику, яким можна знехтувати), де ризик втрати стійкості наближається до нуля для обводнених порід підшови гірничої виробки, становить 0...31 добу, для повітряно-сухих – 0...64 доби. Середня область ризику знаходиться в інтервалі 0...1 і визначається проміжними значеннями, які можуть бути уточнені за відносною швидкістю зміни зсувів підшови гірничої виробки (рис. 6).

Таким чином, обґрунтовано метод ідентифікації ризиків втрати стійкості виробок за геомеханічними та гідрогеологічними чинниками в умовах гірничих виробництв. Метод базується на визначеній статистично значущій кількості параметрів та закономірностях поведінки породного масиву, які виявляються шляхом моніторингу гірничих виробок і прогнозу напружено-деформованого стану гірських порід. Аварійну ситуацію визначають для кожного з елементів геотехнічної системи, де повний ризик являє собою суму індивідуальних ризиків окремих значень домінуючих інформативних параметрів.

Визначено параметри зниження міцності гірських порід та залежності зміни ризиків, що виникають внаслідок обводнення породного масиву. Це дозволяє визначати ризики виникнення небезпечних станів породного масиву за різних глибин залягання, рівнів водонасиченості порід та критичних (мінімальних) параметрів міцності в сухому і обводненому станах.

Отримані залежності визначають вихідні умови для ідентифікації ризиків втрати стійкості обводненого породного масиву та створення ризик-орієнтованих технологій підтримання гірничих виробок.

Висновки.

1. Подальший розвиток отримав метод ідентифікації параметрів потенційно-небезпечних станів породного масиву, що відрізняється визначенням закономірностей змін показників ризиків виникнення небезпечного стану контрольованого об'єкта за статистично значущою кількістю

геомеханічних і гідрогеологічних параметрів моніторингу попередніх подій або за трендами і прогнозами подальших подій, залученням моделей нечіткої логіки та експертних правил, які враховують відхилення параметрів кожного з елементів геотехнічної системи «кріплення–породний масив» від точки рівноваги і швидкості зміни цих відхилень за проміжок часу.

2. Визначено зміни показників потенційних ризиків у часі, що виникають внаслідок збільшення напружень у зоні опорного тиску, підвищення навантажень на кріплення, обвалень порід, зниження міцності гірських порід в результаті обводнення та спричиняють втрату стійкості гірничих виробок.

Ризики втрати стійкості кріплення лави внаслідок обвалення покрівлі (для умов утримання покрівлі плавним опусканням на індивідуальному дерев'яному кріпленні) зростають прямо пропорційно часу підтримання оголення і для нижньої частини лави в 3...4 рази перевищують ризики обвалення покрівлі у верхній частині лави.

Ризики зниження міцності гірських порід від впливу фактора обводнення в діапазоні глибин 400...800 м лінійно зростають з інтенсивністю 0,62...0,71 – для аргілітів, 0,49...0,58 – для алевролітів, 0,25...0,37 – для пісковиків. Отримані залежності визначають вхідні умови для ідентифікації стійкості обводненого породного масиву та створення ризик-орієнтованих технологій підтримання гірничих виробок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Круковский А. П., Круковская В. В. Обзор существующих методов расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости массива горных пород. *Геотехническая механика*. 2002. № 36. С. 178–185.
2. Круковская В. В., Молчанов А. Н., Калугина Н. А. Особенности математического моделирования фильтрации метана вблизи тектонических нарушений. *Геотехническая механика*. 2015. № 121. С. 115–127.
3. Булат А. Ф. и др. Комплексование методов оценки геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве для систем контроля производственной среды шахт. *Геотехническая механика*. 2017. № 134. С. 3–21.
4. Булат А. Ф. та ін. Нова фізико-геологічна модель генезису вугільного метану та перспективи її застосування. *Вугілля України*. 2014. № 4. С. 29–34.
5. Slashchov A., Yalanskyi O. Substantiation of fuzzy logic algorithms for control problems of a geotechnical systems. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 109. P. 91.
6. Slashchov I. M. et al. Forecast of potentially dangerous rock pressure manifestations in the mine roadways by using information technology and radiometric control methods. *Mining of Mineral Deposits*. 2019. № 13 (4). Pp. 9–17.
7. Павлов С. Н. Системы искусственного интеллекта : учеб. пособ. Томск : Эль Контент, 2011. Ч. 1. 176 с.

8. Рудько Г. І. та ін. Геоінформаційні технології в надрокористуванні (на прикладі ГІС К-MINE) : монографія. Київ : Академпрес, 2011. 335 с.
9. Булат А. Ф. та ін. Обґрунтування методів і алгоритмів оцінки геомеханічної безпеки ведення гірничих робіт. *Геотехнічна механіка*. 2017. № 135. С. 16–31.
10. Слащев И. Н. Применение информационных технологий для повышения эффективности и безопасности горных работ. *Уголь Украины*. 2013. № 2. С. 40–43.
11. Слащёв А. И. и др. Иерархическая модель формализации нечеткого логического вывода для цифровых систем оценки устойчивости горных выработок. Днипро : ИГТМ НАНУ, 2019. № 149. С. 122–131.
12. Slashchova O. A., Yalanskyi O. A., Slashchov A. I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. *Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural ources : book of abstracts of the 3^d International sc. and tech. conf.* Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publishing, 2020. Pp. 126–127.

REFERENCES

1. Krukovskiy A.P. and Krukovskaya V.V. *Obzor sushchestvuyushchikh metodov rascheta napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ustoychivosti massiva gornykh porod* [Review of existing methods for calculating the stress-strain state and stability of a rock massif]. *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2020, no. 36, pp. 178–185. (in Russian).
2. Krukovskaya V.V., Molchanov A.N. and Kalugina N.A. *Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya fil'tratsii metana vblizi tektonicheskikh narusheniy* [Features of mathematical modeling of methane filtration near tectonic faults]. *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2015, no. 121, pp. 115–127. (in Russian).
3. Bulat A.F. et al. *Kompleksirovaniye metodov otsenki geomekhanicheskikh i gazodinamicheskikh protsessov v porodnom massive dlya sistem kontrolya proizvodstvennoy sredy shakht* [Evaluation methods of interconnected geomechanical and gas dynamic processes in the rock massif for the systems of working medium control in the mines]. *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2017, no. 134, pp. 3–21. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2017.134.003>. (in Russian).
4. Bulat A.F. et al. *Nova fizyko-heolohichna model' henezysu vuhil'noho metanu ta perspektyvy yiyi zastosovannya* [A new physico-geological model of coalbed methane genesis and prospects for its application]. *Vuhillya Ukrayiny* [Coal of Ukraine]. 2014, no. 4, pp. 29–34. (in Ukrainian).
5. Slashchov A. and Yalanskyi O. Substantiation of fuzzy logic algorithms for control problems of a geotechnical systems. E3S Web of Conferences. 2019, vol. 109, p. 91. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900091>.
6. Slashchov I.M. et al. Forecast of potentially dangerous rock pressure manifestations in the mine roadways by using information technology and radiometric control methods. *Mining of Mineral Deposits*. 2019, no. 13 (4), pp. 9–17. URL: <https://doi.org/10.33271/mining13.04.009>.
7. Pavlov S.N. *Sistemy iskusstvennogo intellekta : ucheb. posob.* [Artificial intelligence systems : textbook allowance]. Part 1, Tomsk : El Kontent, 2011, 176 p. (in Russian).
8. Rudko H.I. et al. *Heoinformatsiyini tekhnolohiyi v nadrokorystuvanni (na prykladi HIS K-MINE) : monohrafiya* [Geoinformation technologies in subsurface management (by the example of K-MINE geoinformation system)]. Kyiv : Akadempres Publ., 2011, 335 p. (in Ukrainian).
9. Bulat A.F. et al. *Obgruntuvannya metodiv i alhorytmiv otsinky heomekhanichnoyi bezpeky vedennya hirnychyykh robit* [Validation of methods and algorithms for estimating geomechanical safety of mining operations]. *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2017, no. 135, pp. 16–31. (in Ukrainian).
10. Slashchov I.N. *Primeneniye informatsionnykh tekhnologiy dlya povysheniya effektivnosti i bezopasnosti gornykh robot* [The use of information technology to increase the efficiency and safety of mining operations]. *Ugol' Ukrainy* [Coal of Ukraine]. 2013, no. 2, pp. 40–43. (in Russian).
11. Slashchov A.I. et al. *Iyerarkhicheskaya model' formalizatsii nechetkogo logicheskogo vyvoda dlya tsifrovyykh sistem otsenki ustoychivosti gornykh vyrabotok* [The hierarchical model of fuzzy logic output formalization for digital systems evaluating mine workings stability]. No. 149, Dniipro : IGTM NASU Publ., 2019, pp. 122–131. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2019.149.122> (in Russian).
12. Slashchova O.A., Yalanskyi O.A. and Slashchov A.I. Control of geomechanical processes using intelligent algorithms on the basis of fuzzy logic methods. *Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural ources : book of abstracts of the 3^d International sc. and tech. conf.* Petroșani, Romania : UNIVERSITAS Publ., 2020, pp. 126–127.

Надійшла до редакції: 14.09.2022.