

УДК 622.86.043.3

DOI: 10.31474/2415-7902-2021-1(6)-2(7)-24-35

**В.Б. Гого, Б.Б. Кобилянський, Ю.І. Сімонова, К.В. Грядущий, Н.С. Черних,
О.Е. Кіпко, О.В. Агафонов**

ОБГРУНТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕРГАТИЧНОЇ СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ГІРНИКІВ ВУГІЛЬНОЇ ШАХТИ

Мета. Метою статті є обґрунтування математичної моделі та функціональних зв'язків складових компонентів інноваційної антропоцентричної ергатичної системи безпеки праці (АЦЕС БП) гірників вугільних шахт для підвищення ефективності заходів з охорони праці.

Методика. В основу загальних методів дослідження покладено системний підхід до аналізу процесів негативних дій чинників та факторів на працю гірників в умовах вугільних шахт, а також процесів, які включають комплекс аналітичних досліджень для розробки математичної моделі системи «людина-машина-середовище» на основі математичного аналізу, експериментальних досліджень з обробкою даних методами математичної статистики і теорії стохастичних процесів, а також узагальнення закономірностей стосовно заходів безпечної праці гірників в умовах вугільних шахт.

Результати. Результати аналізу стану безпеки праці за 2010-2020 рр. засвідчили, що вугільна галузь України є найбільш травмонезбезпечною у вітчизняній промисловості, а це не припустимо у час демократичних змін в державі. На жаль, для покращення такого стану у вітчизняній науки недостатньо відповідних досліджень для рекомендацій з вирішення проблеми підвищення безпеки праці в гірництві. З цієї причини нами виконано оцінку ризиків небезпек в системі «людина - машина-середовище» для основних виробничих процесів вугільної шахти. Обґрунтовано необхідність розробки нових концептуальних рішень для створення інноваційної системи безпеки праці у вуглевидобувній галузі України.

Наукова новизна. На основі досліджень за методиками статистичного аналізу та ймовірного підходу до небезпечних процесів в гірництві було розроблено і доведено до практичної реалізації методи оцінки ризиків праці шахтарів, а також обґрунтування структури інноваційної математичної моделі антропоцентричної ергатичної системи безпеки праці (АЦЕС БП) гірників вітчизняних вугільних шахт для відомої в охороні праці системи «людина-машина-середовище».

Практична значимість. Аналітично визначено закономірності та функціональні зв'язки факторів для побудови математичної моделі антропоцентричної ергатичної системи безпеки праці гірників вугільних шахт, яка відрізняється від відомих попередніх лінійних систем «людина-машина-середовище» тим, що є сферично-просторовою, з центром - сферою «людина - інформація» із внутрішніми чинниками, що негативно пропорційно впливають на працездатність і ризики безпеки праці, а радіально від центру і зворотно діють зовнішні фактори сфер «машин» і «середовища», що концентрично охоплюють сферу людини. При цьому параметри безпечних дій людей/шаhtarів у системі визначаються за відповідними нормативами охорони праці у гірництві (як наприклад, максимальна температура рудникового повітря, що не має перевищувати 26⁰С для безпечної праці гірників у вугільних шахтах).

Ключові слова: вугільна шахта, безпека праці, ергатична система, людський фактор, управління безпекою праці.

Вступ. Сучасний стан паливно-енергетичної промисловості України, а також оглядні перспективи, вимагають від науковців та спеціалістів галузі пропозицій, щодо підвищення ефективності заходів з охорони та безпеки праці гірників, особливо глибоких вугільних шахт Донбасу.

Аналіз наукових досліджень з безпеки праці у вітчизняному гірництві [1- 6], показав, що виробнича система «людина-машина-середовище» потребує корінних змін у прогнозуванні процесів вугільної галузі і, перш за все, для охорони праці в складних умовах шахт Північно-західного Донбасу.

Разом з певними успіхами науковців та практиків охорони праці у гірництві, зберігається важлива наукова складова проблеми – необхідність розкриття механізмів і закономірностей впливів негативних внутрішніх та зовнішніх факторів на безпеку праці гірників. При цьому не поставлено і не вирішено важливі теоретичні питання з розвитку уявлень про структурність та комплексність дій негативних факторів на систему «людина - машина - середовище» для підвищення ефективності охорони праці. Ця обставина зберігає застарілі підходи до вибору заходів управління безпекою праці гірників. Разом з тим, аналіз наукових досліджень показує, що проблему підвищення ефективності заходів безпеки праці гірників слід вирішувати комплексно, на основі розробки та застосування інноваційної моделі ергатичної системи «людина - машина - середовище», яка б ураховувала домінуючий «людський фактор» в сучасному техногенному злитті людини з машиною.

Отже, вивчення механізмів негативних впливів виробничих факторів та закономірностей прояву специфічного «людського фактору» в системі «людина - машина - середовище», є актуальним та значущим для зниження рівнів ризиків праці шахтарів у важких підземних умовах.

Актуальність означеної проблеми її наукова, технічна і соціальна значущість сконцентрувалися у важливу її частину розкриття механізмів і закономірностей функціонування ергатичної системи «людина - машина - середовище» для підвищення безпеки праці шахтарів за внутрішніми та зовнішніми факторами, що знизить рівень ризиків праці гірників вітчизняних вугільних шахт.

Метою статті є обґрунтування математичної моделі та функціональних зв'язків складових компонентів інноваційної антропоцентричної ергатичної системи безпеки праці (АЦЕС БП) гірників вугільних шахт для підвищення ефективності заходів з охорони праці.

Об'єкт дослідження – процеси в системі «людина-машина-середовище» з безпеки праці в умовах вугільних шахт України.

Предмет дослідження – складові та закономірності антропоцентричної ергатичної системи безпеки праці гірників.

В основу загальних **методів дослідження** покладено системний підхід до аналізу процесів негативних дій чинників та факторів на працю гірників в умовах вугільних шахт, а також процесів, які включають комплекс аналітичних досліджень для розробки математичної моделі системи «людина-машина-середовище» на основі математичного аналізу, експериментальних досліджень з обробкою даних методами математичної статистики і теорії стохастичних процесів, а також узагальнення закономірностей стосовно заходів безпечної праці гірників в умовах вугільних шахт.

Виклад основного матеріалу. Особливості побудови математичної моделі антропоцентричної ергатичної системи безпеки праці гірників та етапів її розробки а також міркувань стосовно побудови моделі визначаються в межах тривалого часу (2010-2020pp) досліджень, об'єднаного в трьох етапах.

Перший етап (2010 -2014pp) став накопиченням статистичного матеріалу характеристик та складових безпеки праці гірників вугільних шахт Донбасу з обґрунтуванням концептуального змісту завдань і сутності побудови математичної моделі в межах прийнятої формалізації процесів системи. Другий етап (2015-2017pp) поєднав аналітичний опис математичної моделі ергатичної системи безпеки праці гірників та алгоритмізацію домінуючих процесів із застосуванням сучасного

стандартного комп'ютерного програмного забезпечення. Третій етап (2018-2020рр) склався з результатів моделювання ергатичної системи безпеки праці гірників вугільних шахт України та інтерпретації отриманих закономірностей і функціональних зв'язків, відповідно до антропоцентричної побудови ергатичної системи «людина – машина – навколишнє середовище» з основними узагальненнями і рекомендаціями.

Очевидно, що для математичного моделювання означеної стохастичної системи «людина – машина – середовище» у загальному випадку побудови АЦЕС БП для умов вугільної шахти, треба накопичити визначальні статистичні характеристики стосовно реального об'єкту (у вигляді інформаційних масивів даних і показників з безпеки праці гірників у вугільних шахтах), щоб обґрунтовано перейти до ергатичної моделі, а далі дослідити її як антропоцентричну модель за таким змістом: реальний об'єкт (формалізація і побудова моделі); математична модель (сутність її та математичний опис); результат моделювання та кореляція з реальністю. При цьому нами виконано такі завдання:

1. Постановка умови для математичного моделювання.
2. Опис побудови (схемна візуалізація) моделі (у вигляді блоків і графів).
3. Аналітичні складові математичної моделі та варіанти можливих комп'ютерних програм вирішення функціональних рівнянь.
4. Перевірка вірогідності станів моделі ергатичної системи безпеки праці гірників вугільних шахт та її корегування до реального об'єкту.
5. Аналіз результатів дослідження.

У зв'язку з означеним, доречно, виділити основні завдання математичного моделювання системи (S) АЦЕС БП гірників з побудови концептуальної моделі системи та її формалізації, алгоритмізації, комп'ютерної реалізації та інтерпретації результатів моделювання.

Першим у постановці задачі математичного моделювання АЦЕС БП є побудова моделі системи «людина – машина – середовище» за антропоцентричною схемою, у якій всі дії відбуваються від людини у просторі до машин та середовища та зворотно до людини – працівника. Отже, основним призначенням цієї дії є перехід від змістовного опису реального об'єкту (існуючої узагальненої системи безпеки праці гірників) до її математичної моделі, іншими словами, формалізації об'єкту.

Друге завдання моделювання втілюється у математичну модель аналізу станів Марківських процесів стохастичних систем з диференціальними рівняннями Колмогорова – Чепмена [1].

Очевидний зв'язок перерахованих завдань математичного моделювання ергатичної системи безпеки праці гірників та їх складових викладено у вигляді формального алгоритму конкретних дій, що зображено на рис. 1.

Загальна структура алгоритму побудови математичної моделі АЦЕ БП наведено на рис. 2.

Як було зазначено вище, в дослідженні прийнято, що в ергатичній моделі безпеки праці гірників, в якій «людина» умовно поєднана з «машиною» в один компонент «людина + машина», що діють в «середовищі», то для визначення ймовірності переходу системи у небезпечний стан в певний інтервал робочого часу Δt доцільно використати параметр щільності ймовірності переходу у цей стан. Для інтервалу часу Δt ймовірність переходу системи у небезпечний стан визначаємо саме таким чином. Відповідаючи завданню попередження нещасного випадку з гірниками у АЦЕС БП,

визначаємо ймовірність станів системи для виробничого часу відповідно: $p_1(t)$, $p_2(t)$, ... $p_n(t)$.

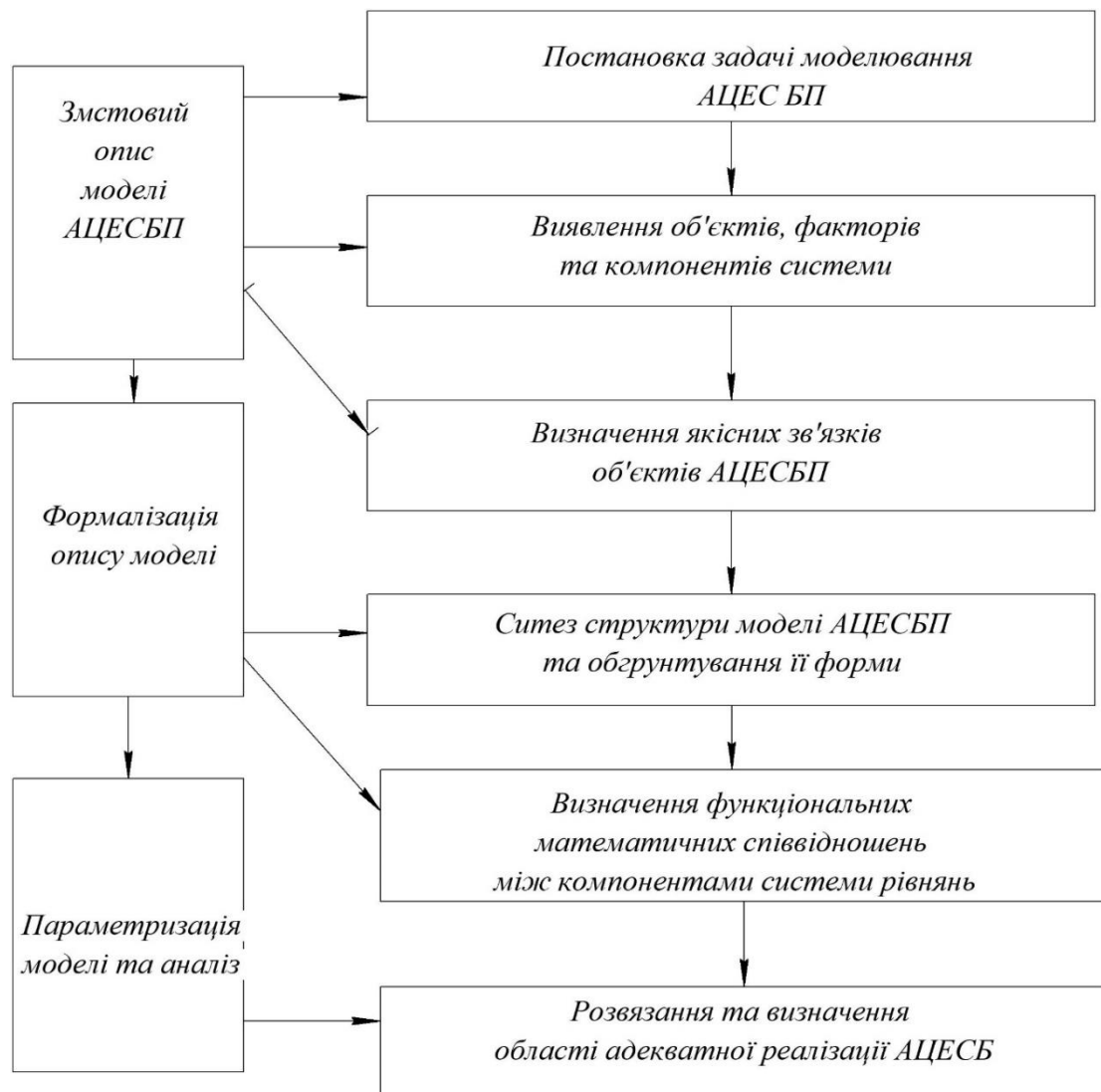


Рисунок 1 – Формальний алгоритм побудови математичної моделі АЦЕС БП гірників

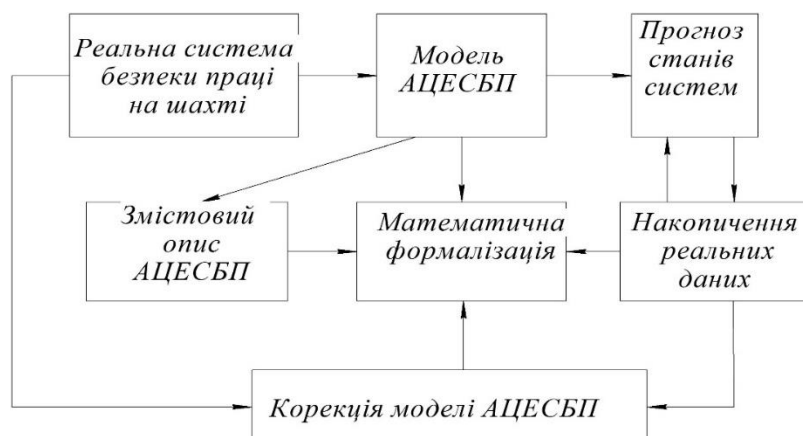


Рисунок 2 – Загальна структура алгоритму побудови математичної моделі АЦЕ БП

Попередніми нашими дослідженнями [2]. встановлено, що комплексний «людський фактор» (Human factor - Н) у роботі гірника/ів є домінуючим для визначення ймовірності настання нещасного випадку, тому ми приймаємо його як функцію (Н) професійних виробничих дій гірника у змінних виробничих обставинах для побудови математичної моделі АЦЕС БП за функціональним графом різних станів ергатичної системи «людина-машина-середовище» (рис. 3).

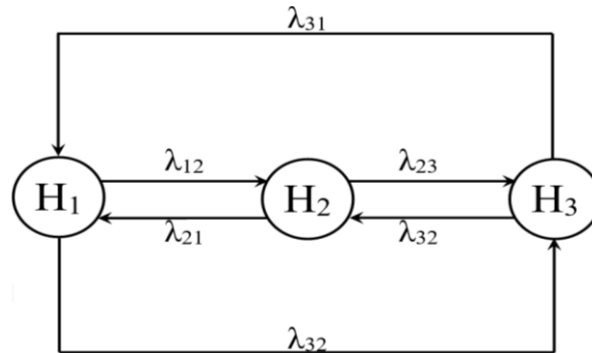


Рисунок 3 – Функціональний граф станів ергатичної системи АЦЕС БП

У функціональному графі (рис.3) нами прийнято такі визначення:

H_1 – функція професійних дій гірника відповідає нормативним, а робітниче навантаження не спричиняє перевантаження та шкоди здоров'ю;

H_2 – функція професійних дій гірника, що відбуваються в межах допустимих перевантажень, але незначний час і не впливають на його працездатність;

H_3 – функція професійних дій гірника, які виконуються із надмірним перевантаженням організму, що становить певну загрозу для робітника та виробництва.

На схемі функціонального графу ми зазначили можливі переходи і взаємні зв'язки між станами функцій (Н) професійних виробничих дій гірника/ів, що уможливило застосувати систему диференціальних рівнянь Колмогорова – Чепмена [1] як математичний опис моделі АЦЕС БП у такому вигляді:

$$\begin{aligned}\frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda_{12}P_1(t) + \lambda_{13}P_1(t) - \lambda_{31}P_3(t) - \lambda_{21}P_2(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} &= \lambda_{23}P_2(t) + \lambda_{21}P_1(t) - \lambda_{12}P_3(t) - \lambda_{32}P_3(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} &= \lambda_{31}P_3(t) + \lambda_{32}P_2(t) - \lambda_{23}P_3(t) - \lambda_{13}P_3(t).\end{aligned}$$

В системі нами прийнято такі позначення: вірогідність (P), що відповідає стану функції (Н) для часу (t); λ - визначає інтенсивність переходу від одного стану функцій (Н) до іншого з відповідною вірогідністю (P).

Виконаємо дослідження стосовно вірогідностей (P), що відповідає певним станам функцій (Н) у часі для стохастичного робочого процесу шахтарів з АЦЕС БП, приймаючи результативну вірогідність стану системи для декількох несумісних випадків (A), у такому вигляді:

$$P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = 1.$$

Вважаємо, що кожна вірогідність може бути складною, а саме :

$$\dot{p} + \gamma_0(x)p = f(x) + \xi(x, t), \quad (2.1)$$

де p – узагальнена вірогідність стану системи;

$\gamma_0(x)$ – кінетичний коефіцієнт зміни стану системи;

x – узагальнена безрозмірна координата події в системі;

$f_0(x)$ – узагальнена детермінована вірогідність у досліджуваному об’ємі простору АЦЕС з боку джерела негативного впливу;

$\xi(x, t)$ – узагальнена стохастична величина, що враховує негативні дії робочого докілья (наприклад, з боку гірських порід у вибої);

Приймаємо такий закон зміни узагальнених детермінованих вірогідностей:

$$f_0(x) = \alpha x - \beta x^3,$$

де α и β – довільні флуктуаційні параметри в об’ємі АЦЕС БП.

Узагальнена стохастична характеристика має такий вигляд:

$$\xi(x, t) = g(x)G(t), \quad (2.2)$$

де $g(x)$ – мультиплікативна функція, залежна від координати події;

$G(t)$ – функція, що визначає час події.

Якісний вираз (2.1) вірогідності може мати множину виглядів, але ми маємо змогу застосувати для нього метод ефективного потенціалу. Для цього приймаємо дуже малий параметр $\theta \ll 1$, тоді:

$$\theta^2 = \frac{m}{\lambda}; \quad \chi = \beta^{-1}; \quad x_0^2 = \frac{\alpha}{\beta}, \quad (2.3)$$

де λ – інтенсивність переходів з кінетичним коефіцієнтом $\gamma(x)$.

Перейдемо до безрозмірних величин:

$$\bar{x} = \frac{x}{x_0}; \quad \bar{m} = \frac{m}{m_0}; \quad \pi = \frac{\alpha}{\lambda}, \quad (2.4)$$

де x_0 , m_0 – відносні початкові параметри досліджуваного об’єму АЦЕС виробничого робочого простору.

Запишемо величину вірогідності у співвідношенні:

$$\bar{P} = \bar{m} \frac{d\bar{x}}{dt} = \frac{\lambda \theta^2}{m_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{x}{x_0} \right). \quad (2.5)$$

Тоді (2.1) набуває такого вигляду:

$$\dot{P} + \bar{P} \gamma(x) = \alpha x - \beta x^3 + g(x)G(t). \quad (2.6)$$

Поставимо за мету статистично дослідити поведінку функції розподілу вірогідності стану робочого об’єму АЦЕС в залежності від «потенціалу системи $\varphi(x, t)$ », що визначає «енергетичну» спроможність здійснення негативної дії певної компоненти системи за таким зв’язком:

$$P(x, t) = f\{\varphi(x, t)\}. \quad (2.7)$$

Приймаємо, що функція потенціалу $\varphi(x, t)$ досліджуваного об’єму простору АЦЕС задовольняє рівнянню її неперервності, а саме:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\theta^2} L(x, t) \right\} \varphi(x, t) = \frac{1}{\theta} \text{tg}(x) G(t) \frac{\partial}{\partial t} \varphi(x, t), \quad (2.8)$$

де $L(x, t)$ – оператор вірогідності певного стану системи:

$$L(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \gamma(x) + \theta \left[\pi \frac{\partial}{\partial x} + f(x) \frac{\partial}{\partial t} \right]. \quad (2.9)$$

Тоді для функції потенціалу будемо мати:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\theta^2} L(x, t) \right\} \varphi(x, t) = -\frac{1}{\theta^2} \frac{\partial}{\partial t} g(x) \int_0^t c(t) e^{-L(t-\tau)} g(x) \frac{\partial}{\partial t} \varphi(x, t) d\tau. \quad (2.10)$$

Кореляційна функція визначається умовою:

$$\langle \xi(x, t) \rangle = 0; \quad c(t) \equiv \sigma^2 \exp[-\nu(t-\tau)], \quad (2.11)$$

де ν – фактор змін в АЦЕС БП.

Замінімо у (2.10) інтегральний оператор на символ суми $L(x, t)$:

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial t} + \frac{1}{\theta^2} L(x, t) \right\} P(x, t) = \frac{1}{\theta^2} L(x, t) P(x, t). \quad (2.12)$$

Зробимо обмежений перехід до суми:

$$L(x, t) = g(x) \frac{\partial}{\partial t} \sum_0^\infty c(t) L(x, t). \quad (2.13)$$

В (2.13) задіяна кореляційна функція, яку визначаємо так:

$$c_k(t) = \frac{1}{k!} \int_0^\infty \tau^k c[t, (t - \tau)] d\tau. \quad (2.14)$$

Для суми (2.13) визначаємо члени нульового и першого порядків:

$$\lambda_0 = C^{(0)} g^2(x) \frac{\partial^2}{dt^2}; \quad (2.15)$$

Тоді будемо мати для оператору вірогідності:

$$L_1 = -g(x) \frac{\partial^2}{\partial t^2} + \theta \left(-\frac{\nabla g^2(x)}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left[1 + t \frac{\partial}{\partial t} \right] + g^2(x) \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t} \right). \quad (2.16)$$

Отже, можливі функції вірогідності станів АЦЕС БП у інтегральному виразі мають такий вигляд:

$$P_n(x, t) = \int_0^\infty P(x, t) dt. \quad (2.17)$$

На підставі (2.17) отримуємо рішення для (2.12), приймаючи для (2.17) випадок, коли $n=0$, тоді:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{1}{\theta} \frac{\partial P_1}{\partial x}. \quad (2.18)$$

Для першого вигляду вірогідності при $n=1$ маємо:

$$P_1 = \theta \frac{1}{\gamma(x)} \left(f(x) P - \frac{\partial P_2}{\partial x} - C^{(1)} g^2(x) \frac{\partial P}{\partial x} \right). \quad (2.19)$$

Для можливої другої вірогідності маємо P_2 :

$$P_2 = \frac{g^2(x)}{\gamma(x)} (C^{(0)} + C^{(1)} \gamma(x)) P(x). \quad (2.20)$$

На підставі (2.18), а також (2.19) та (2.20) запишемо (2.12) у вигляді вірогідності стану АЦЕС БП, а саме:

$$\frac{\partial}{\partial t} P = \nabla (-D^{(1)} P + D^{(2)} P), \quad (2.21)$$

У (2.21) маємо дрейфуючу ($D^{(1)}$) та дифузну ($D^{(2)}$) складові, що можуть мати такий вираз:

$$D^{(1)} = \frac{1}{\gamma(x)} [f(x) + C^{(1)} \nabla g^2(x)] - C^{(1)} g^2(x) \nabla \ln \gamma(x); \quad (2.22)$$

$$D^{(2)} = C^{(0)} \frac{g^2(x)}{\gamma^2(x)}. \quad (2.23)$$

Аналіз (2.22) и (2.23) за складовими дрейфу $D^{(1)}$ та дифузії $D^{(2)}$, дає можливість зробити висновок, що поряд з коливаннями вірогідностей станів АЦЕС БП також виникають певні частотні зміни у компонентів, які генеруються синергетическими змінами у досліджуваному об'ємі робочого простору АЦЕС. Це уможлиблює застосування відомої квазігібсовської формули [1] у такому вигляді:

$$P(x) = \exp \left[\frac{-U(x)}{C^{(0)}} \right], \quad (2.24)$$

де $P(x)$ – узагальнений вираз синергетичної вірогідності стану АЦЕС;

$U(x)$ – енергетичний потенціал досліджуваного робочого об'єму простору АЦЕС БП;

$C^{(0)}$ – кореляційна функція початкового енергетичного стану системи з усіма складовими компонентами.

Приймаємо, що енергетичний потенціал визначається структурною залежністю у такому вигляді:

$$U(x) = -\int [f(x) + C^{(1)} \nabla g^2(x)] dx + C^{(0)} (\ln g^2 - \ln \gamma). \quad (2.25)$$

Для квазістаціонарного стану обраного об'єму простору подій стохастичної АЦЕС БП у початковому стані, наприклад, за однією (з трьох) координат, $x = x_0$, запишемо:

$$U(x_0) = -\frac{\varepsilon}{2} x_0^2 - \frac{\varepsilon - 1}{4} x_0^4 + \frac{x_0^6}{6} - \sigma^2 \ln(1 + x_0^2), \quad (2.26)$$

де ε – керуючий параметр стосовно станів системи; σ – можлива інтенсивність змін у станах системи.

Для несиметричних змін керуючого параметру, наприклад, пов'язаного з людським фактором, приймаємо такий зв'язок:

$$\varepsilon = \frac{2\sigma^2}{\nu} \left(1 - \frac{1}{\nu}\right). \quad (2.27)$$

Тоді будемо мати:

$$x_0^4 + \frac{2}{3} (2 - \varepsilon_0 - 2C^{(1)}) x_0^2 + \frac{1}{3} (1 - 2\varepsilon_0 - 4C^{(1)}) = 0. \quad (2.28)$$

З (2.28) визначаємо початкове значення керуючого параметру ε_0 .

Застосуємо (2.27) для графічної побудови можливих станів за $U(x)$ в залежності від керуючого параметру та інтенсивності змін у певному об'ємі робочого простору АЦЕС БП за (2.26). Очевидно, що має реалізуватися дві розв'язки – метастабільна та нестабільна, параметризовані частотою дії негативних факторів в АЦЕС БП, що наведено на рис. 4.

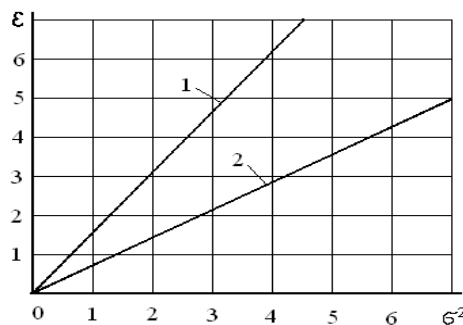


Рисунок 4 – Залежності керуючого параметру ε_0 від інтенсивності змін в системі

Проведемо дослідження певних особливостей розсіювання функцій розподілу енергетичного потенціалу означеного робочого простору АЦЕС БП. Очевидно, що для ефективного синергетичного потенціалу системи треба мати його визначення:

$$U(x) = \frac{\varepsilon}{2(1-a)} x^{2(1-a)} + \frac{1-\varepsilon}{2(2-a)} x^{2(2-a)} + \frac{x^{2(1-a)}}{2(3-a)} - C^{(1)} a x^2 - C^{(0)} \ln(1 + x^2) + 2a [C^{(0)} - C^{(1)}] \ln(x). \quad (2.29)$$

Рівняння екстремумів:

$$x_0^6 - (\varepsilon - 2)x_0^4 - (2\varepsilon - 1)x_0^2 - 2aC^{(1)}x_0^{2(a+1)} - 2[2aC^{(1)} - C^{(0)}(a-1)]x_0^{2a} - 2a[C^{(1)} - C^{(0)}]x_0^{2(a-1)} - \varepsilon = 0. \quad (2.30)$$

Розв'язки (2.30) можливі за умови, що керуючий параметр не перевищує значення ε_0 , що визначається з рівняння:

$$2ax_0^2[(a+1)(C^{(1)}x_0^2 - C^{(0)}) + 2aC^{(1)}] - [3x_0^2 - 2(\varepsilon_0 - 2)x_0 - 2\varepsilon_0 + 1]x_0^{2(2-a)} + 2a(a-1)(C^{(1)} - C^{(0)}) = 0, \quad (2.31)$$

де (a) – певний параметр, що визначає швидкість змін в системі.

Проаналізуємо розв'язки (2.30), що наведені на діаграмі рис. 5.

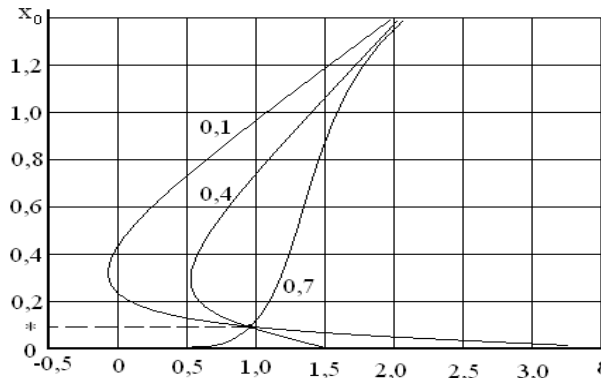


Рисунок 5- Діаграма $x_0(\varepsilon)$ з параметрами $a = 0,1; 0,4; 0,7$

Аналіз діаграми дає можливість стверджувати, що швидкість змін подій в АЦЕС БП у досліджуваному просторі залежить від конкретних змін параметрів складових компонентів системи, а саме головне від частоти проявів негативних впливів.

Певне значення для означеної математичної моделі АЦЕС БП є побудова аналітичного виразу вірогідності безпечного стану системи. Застосуємо розподіл вірогідності для квазістаціонарного стану певного об'єму системи в межах початкових координат (наприклад, $x_0 \rightarrow 0$). Використаємо розподіл вірогідності у формі показової функції, а саме:

$$P(x) = Zx^{-2a(1-\lambda)}, \quad (2.32)$$

де Z – певна нормована стала;

Звернемося до діаграми $x_0(\varepsilon)$ (див. рис. 4), де є дві області для (a) , що залежать від частоти змін параметрів компонентів системи, у вигляді:

$$\frac{\nu}{2(\nu-1)} \leq a \leq 1. \quad (2.33)$$

За умови (2.33) керуючий параметр (2.27) визначаємо так:

$$\varepsilon(0) = \frac{\sigma^2}{\nu} \left(1 - \frac{2}{\nu}\right). \quad (2.34)$$

Враховуючи (2.32-2.34), запишемо функцію розподілу вірогідності (2.1) у такому виді:

$$\lim_{x \rightarrow 0} P(x, t) = C(\varepsilon)\delta(x), \quad (2.35)$$

де $\delta(x)$ – дельта функція.

Таким чином, стан АЦЕС БП є дійсно стохастичним із значною дисипацією «енергії компонентів», де діють «реактивні» складові, з певним керуючим параметром. У такому випадку важливим стає вплив дифузійної складової вірогідності $g(x)$ і кінетичного коефіцієнту $\gamma(x)$. Для дисипативної АЦЕ БП у випадку $x=0$ можна записати:

$$\nabla D^{(0)}(x) = 0;$$

$$\delta\varepsilon(0) = -2C^{(0)}; \quad (2.36)$$

$$\delta\varepsilon(x_1) = -2C^{(1)}; \quad (2.37)$$

Із співвідношень (2.36) и (2.37) маємо, що перехід з начального (нормального) стану АЦЕС БП у досліджуваний (в межах часу робочої зміни шахтарів), можливий не тільки із застосуванням керуючого параметру, але й функціями, що визначають загальну вірогідність з певними частотами змін, що відбуваються в системі «людина – машина – довкілля». Зрозуміло, що конкретне визначення вірогідності стану АЦЕС БП у часі буде залежить від ретельного збору початкових та визначальних параметрів компонентів всієї системи.

Висновки. Як можливе спрощене вирішення системи трьох рівнянь математичної моделі АЦЕС БП, викладемо таке узагальнення, вважаючи, що для певного часу виробничого процесу, наприклад на видобувній ділянці у вугільній шахті, стан функції професійних дії гірників відповідає нормативним, а робітниче навантаження на гірника не спричиняє шкоди і не створює проблеми виробництву. Вірогідність такого стану (P_1). Коли функції професійних дій гірників відповідають (H_2) та (H_3), то інтенсивність відповідної вірогідності переходів визначається як λ з відповідними індексами переходів, що зазначені на графі (див. рис. 3). Знайти ми маємо розподілення вірогідностей станів для будь-якого часу та фінальних очікуваних вірогідностей станів для оцінки безпечності виробничого процесу гірників у досліджуваних умовах.

Приймаємо, що виробничому процесу вугільної шахти відповідають професійні дії гірників, а вся система безпеки праці на основі АЦЕС характеризується стохастичними процесами з дискретними станами, що визначено раніше графом та диференційними рівняннями. Для визначеності надамо параметрам системи трьох диференційних рівнянь такі значення: $\lambda_{12} = 0,5$; $\lambda_{23} = 3$; $\lambda_{13} = 1,5$; $\lambda_{31} = 2$; $\lambda_{32} = 1,5$; $\lambda_{21} = 0,7$. Вважаємо, що для початку $P_1(0) = 1$. Якщо прийняти, що ліві частини трьох рівнянь дорівнюють нулю, то отримаємо систему лінійних рівнянь із сталими коефіцієнтами. Для її вирішення застосуємо програму MathCAD, яка має необхідні стандартні процедури для розв'язки такої системи. Вирішення системи алгебраїчних рівнянь дає значення, що для часу $t=5$ створюється стабілізація випадкового процесу у переходах станів для оцінки безпечності виробничого процесу гірників. Очевидно, що стійкість рішення має сенс перевірити на стійкість власних чисел, що має система.

Зрозуміло, що проблема стійкості такого класу системи рівнянь вимагає знаходження кінцевих вірогідностей досліджуваного стохастичного процесу безпеки праці гірників вугільних шахт. Якщо прийняти до уваги, що нормуюча умова для вірогідностей дозволяє створити неоднорідну систему лінійних рівнянь, то засобами MathCAD з функцією `lsolve (A,b)` стає можливим вирахувати остаточні значення вірогідностей станів системи. При цьому такі остаточні значення вірогідностей станів дозволяють аргументовано тлумачити, що середній час перебування системи безпеки праці гірників у цьому стані визначається саме для цієї вірогідності. Отримані таким чином значення вірогідності, визначають, що 56% часу досліджувана АЦЕС БП за прийнятих умов буде у нормальному стані функціонування, 38% часу буде діяти з непереобтяжливим перевантаженням гірників, а 6% часу можливі професійні дії гірників, що відбуваються з надмірним перевантаженням організму, та можуть становити загрозу для працездатності робітників та суттєвого негативу для вугільної шахти.

Список літератури

1. Вентцель А. Д., Курс теории случайных процессов. — М.: Наука, 1996. — 400 с.
2. Гого В.Б., Кобилянський, Б.Б. Аналіз чинників і факторів ергатичної системи безпеки праці шахтарів України /В.Б. Гого, Б.Б. Кобилянський // Вісті Донецького гірничого інституту. 2020. № 2 (47). - С. 194-205.
3. Кобилянський, Б.Б. Удосконалення безпеки робіт в умовах нестабільного середовища на гірничих підприємствах/ Б.Б. Кобилянський // Вісті Донецького гірничого інституту. 2020. № 1 (46). С. 189-198.

4. Мнухин А.Г., Кобылянский, Б.Б. Усовершенствованная эргатическая система типа «человек-машина-среда» применительно к угольной шахте / Б.Б. Кобылянский, А.Г. Мнухин // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2018. № 2 (109) частина 1. С. 86-93.
5. Кобылянский, Б.Б. Построение эргатической системы «человек–машина–среда» применительно к шахте, опасной по выбросам газа или пыли / Б. Б. Кобылянский, А. Г. Мнухин // *Уголь Украины*. – 2016. - № 9-10. – С. 45-54.
6. Мнухин А.Г., Кобылянский, Б.Б. Применение методов непараметрической статистики для оценки некоторых особенностей горного производства / А. Г. Мнухин, Б. Б. Кобылянский, // *Уголь Украины*. – 2016. - № 3. – С. 44-48.

References

1. Venttsel' A. D. (1996) Course of the theory of random processes [Kurs teorii sluchaynykh protsessov]. M.: Nauka, — 400 p.
2. Gogo V., Kobylansky, B. (2020) Analysis of factors and factors of ergatic system of labor safety of miners of Ukraine. [Analiz chynnykiv i faktoriv erhatychnoyi systemy bezpeky pratsi shakhtariv Ukrayiny] Journal of Donetsk Mining Institute. № 2 (47). Pp. 194-205.
3. Kobylansky, BB (2020) Improving the safety of work in an unstable environment at mining enterprises [Udoskonalennya bezpeky robit v umovakh nestabil'noho seredovyscha na hirnychkyh pidpryyemstvakh]] Journal of Donetsk Mining Institute. № 1 (46). Pp. 189-198.
4. Mnuhyn A., Kobylansky, B. (2018) An improved ergatic system of the «man-machine-environment» type applied to a coal mine. [Usovershenstvovannaya érgaticheskaya sistema typu «chelovek-mashyna-sreda» pryemnytel'no k uhol'noy shakhte]. Journal of Mykhailo Ostrogradsky Kremenchuk National University. № 2 (109) part 1. Pp. 86-93.
5. Kobylansky, B.B., Mnuhyn A. G. (2016) Construction of an ergatic system «man-machine-environment» in relation to a mine, hazardous in terms of gas or dust emissions. [Postroyeniye ergaticheskoy sistemy «chelovek–mashyna–sreda» primenitel'no k shakhte, opasnoy po vybrosam gaza ili pyli] Coal of Ukraine. No. 9-10. Pp. 45-54.
6. Mnuhyn A.G., Kobylansky, B.B. (2016) Application of methods of nonparametric statistics to assess some features of mining production [Primeneniye metodov neparametricheskoy statistiki dlya otsenki nekotorykh osobennostey gornogo proizvodstva]. Coal of Ukraine. – 2016. – No. 3. S. 44-48.

Надійшла до редакції 29.10.2021

V. Goho, B. Kobylansky, Yu. Simonova, K. Hriadushchii, N. Chernykh, O. Kipko, O. Ahafonov

SUBSTANTIATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE ERGATIC SYSTEM OF SAFETY WORKING OF COAL MINERS

Purpose. The aim of the article is to substantiate the mathematical model and functional relationships of the components of the innovative anthropocentric ergatic system of safety working (AESS SW) of coal miners to increase the effectiveness of labor protection measures.

Research methods. The general research methods are based on the systematic approach of analyzing the processes of negative influence of reasons and factors on the work of coal miners, as well as the processes that include a set of analytical studies to develop a mathematical model of “man-machine-environment” analysis, the experimental research with data processing by methods of mathematical statistics and the theory of stochastic processes, and generalization of patterns of labour safety of coal miners.

Research results. The results of the analysis of the state of occupational safety for 2010-2020 have shown that the coal industry of Ukraine is the most traumatic among the domestic industries, and it is not acceptable taking into consideration the democratic changes in the country. Unfortunately, there is not enough relevant Ukrainian scientific research for recommendations to solve the problem of improving occupational safety in mining. For this reason, a risk assessment of hazards in the “man-machine-environment” system for the main production processes of the coal mine has been performed. The necessity of developing a new conceptual solution for creation of innovative system of labour safety in the coal mining industry of Ukraine has been substantiated.

Scientific novelty. On the basis of researches on the methods of statistical analysis and probabilistic approach to dangerous processes in mining the methods of risk estimation of work of miners, as well as the substantiation of the structure of innovative mathematical model of anthropocentric ergatic system of safety working (AESS SW) of miners of domestic coal mines, have been developed and brought into practical implementation for the well-known in the labor protection “man-machine-environment” system. There have been analytically determined the regularities and functional connections of factors for construction of mathematical model of anthropocentric ergatic system of safety working of coal miners, which differs from previously known linear “man-machine-environment” systems being spherical-dimensional with the “man-information” center-sphere with the internal factors that negatively proportionally affect the efficiency and risks of occupational safety, while radially from the center and back the external factors of the “machines” and “environment” spheres affect, concentrically covering the human sphere. The parameters of safe actions of people / miners in the system

have been determined by the relevant standards of labor protection in mining (such as the maximum temperature of mine air, which should not exceed 26 °C for the safe work of miners in coal mines).

Keywords: coal mine, labour safety, ergatic system, human factor, labor safety management.

Відомості про авторів

Гого Володимир Бейлович, доктор технічних наук, професор, кафедра електромеханіки та машинобудування. Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», пл. Шибанкова, 2, м. Покровск, Україна, 85300, volodymyr.hoho@ii.donntu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2239-4042>

Кобиланський Борис Борисович, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри охорони праці та екологічної безпеки ДВНЗ «Навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Української інженерно-педагогічної академії» вул. Носакова, 9 а., м. Бахмут, Україна, 84500, b.b.kobiliansky@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3226-5997>

Сімонова Юлія Ігорівна, аспірант, кафедра «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» пл. Шибанкова, 2, м. Покровск, Україна, 85300, yuliia.simonova@donntu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9192-7850>

Грядущий Кирило Володимирович, заступник голови правління ПАТ «Науково-дослідний інститут гірничої механіки ім. М.М.Федорова» (м.Київ), sdrec@ukr.net

Черних Надія Сергіївна, старший лаборант кафедри «Електромеханіка і машинобудування» Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» пл. Шибанкова, 2, м. Покровск, Україна, 85300, nadiia.chernykh@donntu.edu.ua, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-3488-2756>

Кіпко Олександр Ернестович, виконавчий директор, доктор технічних наук, академік Академії Будівництва України Трубний завод «Славсант» вул. Харківська, 15-Д, м. Павлоград, Україна, 51400, oleksander.kipko@donntu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-6143>

Агафонов Олександр Васильович, директор проектного і науково-дослідного центру – ПрАТ «Донецьксталь» вул.Торгивельна, буд. 106А, м.Покровськ, Донецька обл., 85300, Україна, agafonov.av@donetsksteel.com

Gogo Volodymyr, Doctor of Technical Sciences, Professor, department of Electromechanics and Mechanical Engineering, State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University» Shybankova sq., 2, Pokrovsk, Ukraine, 85300, volodymyr.hoho@ii.donntu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2239-4042>

Kobilyanskyi Borys, PhD, Associate Professor Department of Labor Protection and Environmental Safety DVNZ “Primary-scientific professional-pedagogical Institute of the Ukrainian Engineering-Pedagogical Academy” Nosakova str., 9 a, Bakhmut, Ukraine, 84500, b.b.kobiliansky@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3226-5997>

Simonova Yuliia, Postgraduate Student, Department of Mining of Mineral Deposits State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University» Shybankova sq., 2, Pokrovsk, Ukraine, 85300, yuliia.simonova@donntu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9192-7850>

Hriadushchii Kyrylo, Deputy Chairman of the Board of PJSC Research Institute of Mining Mechanics M.M. Fedorova (Kyiv), sdrec@ukr.net

Chernykh Nadezhda – Senior laboratory assistant of the Department of Electromechanics and Mechanical Engineering State higher educational institution “Donetsk National Technical University” pl. Shibankova, 2, Pokrovsk, Ukraine, 85300, nadiia.chernykh@donntu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3488-2756>

Kipko Oleksander- Executive Director, Doctor of Technical Sciences Academician of the Academy of Construction of Ukraine Pipe plant “Slavsant” Kharkivska str., 15-D, Pavlograd, Ukraine, 51400, oleksander.kipko@donntu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6398-6143>

Ahafonov Oleksandr – Director of the project and research center – PJSC “Donetskstal” str. Torgivelna, b.106A, Pokrovsk, Donetsk region, 85300, Ukraine, agafonov.av@donetsksteel.com