

О.О. Яворська, Л.А. Новіков, М.Ю. Іконніков

## ЗМІНА КОНЦЕНТРАЦІЇ ПИЛУ У ГАЗОПИЛОВІЙ ХМАРІ ПРИ ВИБУХОВИХ РОБОТАХ У ЗАЛІЗОРУДНОМУ КАР'ЄРІ

*Анотація.* Відкрита розробка родовищ супроводжується викидами у повітря шкідливих фракцій пилу, що призводить до порушення екології навколишнього середовища і підвищує ризик хронічних захворювань. У статті проведена оцінка масової концентрації фракції пилу в газопиловій хмарі на динамічній стадії її формування після масового вибуху у залізорудному кар'єрі. Встановлені діапазони зміни висоти підйому і концентрації фракції пилу. Наведена залежність вмісту фракцій пилу від висоти їх підйому та отримано рівняння регресії.

*Ключові слова:* кар'єр, вибухова речовина, гірська порода, газопилова хмара, динамічна стадія, фракція пилу, концентрація, висота підйому.

**Постановка проблеми.** Відкрита розробка родовищ супроводжується виділенням в повітря шкідливих фракцій пилу та газів. Виділення пилу відбувається при роботі кар'єрного транспорту, бурових та вибухових роботах. Техногенне забруднення повітря твердими частинками пилу діаметрами від 0,001 до 2,5 мкм (PM 2.5) та від 2,5 до 10 мкм (PM 10) є основним фактором ризику хронічних захворювань. Середньодобова концентрація цих частинок у повітрі повинна становити не більше ніж 0,025 мг/м<sup>3</sup> (PM 2.5) та 0,05 мг/м<sup>3</sup> (PM 10) [1].

При масових вибухах у кар'єрах відбувається викид твердих та газоподібних продуктів детонації, включаючи частинки зруйнованих гірських порід, що знаходяться поруч із зарядом вибухової речовини (ВР). Відбувається формування газопилової хмари, в якій концентрація пилу може досягати більше 4000 мг/м<sup>3</sup> (для міцних гірських порід). Фракції пилу з розмірами до 10 мкм можуть досягати висоти до 2 км і переносяться на відстань до 10 км і більше. Шкідливі речовини, що виділяються під час масових вибухів, забруднюють атмосферу кар'єрів та прилеглих до них територій. Зокрема встановлено, що в умовах міста Кривий Ріг запиленість повітря на межі санітарно-захисних зон може перевищувати значення гранично-допустимих концентрацій у 17-200 разів. При цьому відсоток перевищення рівнів гранично допустимих концентрацій (разове значення 0,5 мг/м<sup>3</sup>) на відстанях від 4 до 19 км від масових вибухів зазвичай становить 100% [2]. Тому актуальним питанням є дослідження процесів зміни концентрації фракцій пилу в газопиловій хмарі та їх розповсюдження за межі кар'єру.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [2-6] та інших розглянуто процес формування та динаміка розповсюдження частинок пилу після масових вибухів

у кар'єрах. Зокрема у роботі [2] встановлено, що у газопиловій хмарі фракції пилу з розмірами від 1 до 10 мкм складають більше 30% від загальної маси. У роботі [3] отримано співвідношення для визначення часу та висоти підйому сферичних частинок пилу діаметром до 100 мкм на динамічній стадії формування хмари. Роботи [7, 8] присвячені моделюванню забруднення кар'єрного простору пилом при масових вибухах. Зокрема у роботі [7] встановлено, що за відсутності вітру швидкість міграції частинок пилу досить низька. При цьому фракції пилу з розмірами до 40 мкм осідають досить повільно. У роботі [8] досліджено схеми розсіювання газопилових хмар при проведенні вибухових робіт у глибокому кар'єрі. Встановлено, що швидкість вітру, його напрямок та положення джерела вибуху впливають на схему дифузії та концентрацію частинок пилу. У роботі [9] проведено аналіз складу пилової хмари при масовому вибуху у вапняковому кар'єрі «Taffs Well» (Уельс). Встановлено, що червонувато-сірі хмари складаються переважно з частинок доломітової вапнякової породи, а більш світліші містять частинки вибухового згоряння. У роботі [10] наведено математичну модель руху частинок пилу після детонації заряду ВР. Здійснено моделювання форми газопилових хмар у стані ударного, грибоподібного та дифузійного руху. Також реалізовано моделювання руху частинок пилу у реальному часі.

**Мета роботи** – оцінка середньої концентрації фракції пилу в газопиловій хмарі на динамічній стадії її формування після масового вибуху у залізорудному кар'єрі.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** При масових вибухах у кар'єрах формування газопилової хмари відбувається у дві основні стадії: динамічна (до 1 с) та теплова (до 60 с) [3].

На першій стадії після утворення тріщин у блоці гірських порід під впливом вибуху відбувається інтенсивний вихід в атмосферу продуктів детонації. Висхідний рух частинок пилу та шматків зруйнованої гірської породи (включаючи продукти детонації) відбувається під дією динамічного імпульсу. На другій стадії на частинки пилу діє підйомна сила, яка викликана різницею температур зовні і всередині газопилової хмари (ежекційні потоки повітря). В даному випадку висота підйому хмари буде значно вище. При цьому у верхній частині хмари (наприкінці стадії) будуть міститися фракції пилу переважно до 10 мкм.

На рис. 1 наведено вигляд газопилової хмари на динамічній стадії її формування у залізорудному кар'єрі та схема фракційного розподілу частинок пилу за висотою підйому.

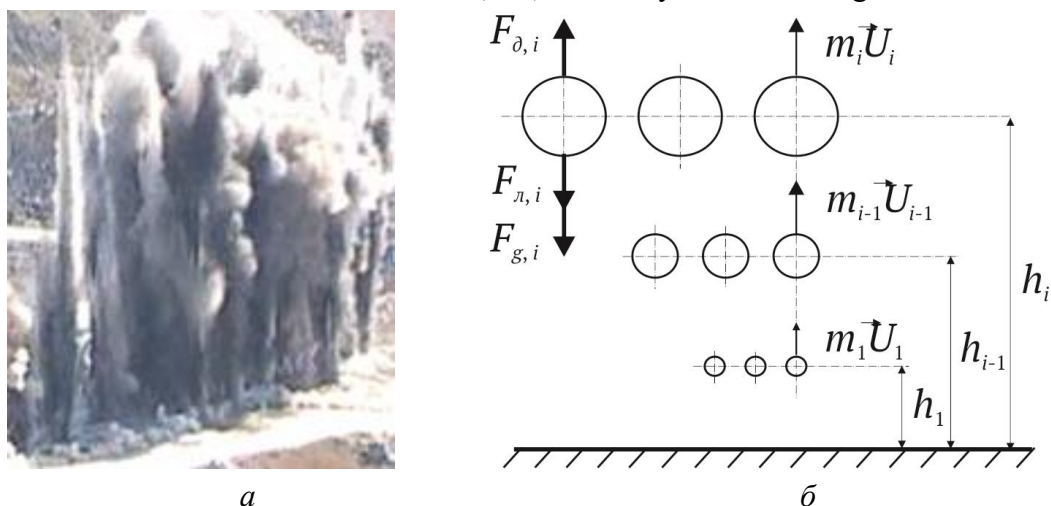


Рисунок 1 – Газопилова хмара на динамічній стадії її формування (а) та схема фракційного розподілу частинок пилу за висотою підйому (б):  $h_i$  – висота підйому фракції пилу, м;  $m_i$  – маса фракції, кг;  $\vec{U}_i$  – вектор швидкості фракції пилу, м/с;  $F_{\Delta,i}$  – сила інерції, Н;  $F_{L,i}$  – сила лобового опору, Н;  $F_{g,i}$  – сила тяжіння, Н

Відповідно до рис. 1, б висхідний рух сферичних частинок пилу під дією сили інерції описується рівнянням

$$\frac{dU_i}{dt_i} = -g - \xi_i \frac{\rho_{zc} U_i^2}{2} \frac{\pi d_i^2}{4} \frac{1}{m_i}, \quad (1)$$

де  $\rho_{zc}$  – щільність газової суміші у хмарі, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi_i$  – коефіцієнт лобового опору фракції пилу;  $t_i$  – час підйому фракції пилу, с;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

На динамічній стадії енергія вибуху надає сферичним частинкам пилу динамічний імпульс

$$p_i = m_i U_i \approx 0,167 \pi d_i^3 \rho U_i, \quad (2)$$

де  $\rho$  – щільність гірської породи, кг/м<sup>3</sup>;  $d_i$  – діаметр частинки пилу, м.

Прийmemo припущення про відсутність впливу температурного фактору (ежекційні потоки повітря у хмарі). Тоді можна казати, що частинки пилу з більшою масою і однаковою щільністю матимуть більший імпульс і відповідно висоту підйому на динамічній стадії. Таким чином буде спостерігатися фракційний поділ частинок пилу.

У роботі [3] були прийняті припущення про сферичність частинок пилу та їх обтікання газовим потоком згідно із законом Стокса. З рівняння (2) було отримано формулу для визначення висоти підйому частинок пилу діаметром до 100 мкм під дією динамічного імпульсу

$$h_i = \frac{u_r \rho d_i^2}{18 \mu_{zc}} \ln \left( \frac{g \rho d_i^2}{g \rho d_i^2 + 18 u_r \mu_{zc}} \right), \quad (3)$$

де  $u_r$  – швидкість виходу залишкових продуктів детонації, м/с;  $\mu_{zc}$  – динамічна в'язкість газової суміші, Па·с.

Викид газу та пилу у продуктах детонації свердловинних зарядів відбувається приблизно з однаковою швидкістю, тобто  $U_i \approx u_r$ .

Для визначення середньої концентрації пилу  $C_{cp}$  (мг/м<sup>3</sup>) у газопиловій хмарі скористаємося емпіричною формулою

$$C_{cp} = 3,25q_y N^{1,68}, \quad (4)$$

де  $q_y$  – питома кількість пилу, яка виділяється під час вибуху 1 м<sup>3</sup> гірської маси, кг/м<sup>3</sup>;  $N$  – сумарна потужність заряду ВР, т.

Концентрація фракції пилу у газопиловій хмарі визначається за формулою

$$C_i \approx n_i C_{cp}, \quad (5)$$

де  $n_i$  – процентний вміст фракцій.

Прийmemo наступні вихідні дані: щільність матеріалу частинок пилу – 3440 кг/м<sup>3</sup> (залізна руда); ВР – «Анемікс»; потужність (загальна маса) заряду ВР – 300 т; насипна щільність набійки – 1800 кг/м<sup>3</sup>; діаметр свердловини – 0,25 м; довжина заряду ВР та набійки – відповідно 11 та 7 м; глибина кар'єру – 295 м; температура атмосферного повітря – 272 К; температура газоподібних продуктів детонації у хмарі – 555 К; вміст оксидів азоту та монооксиду вуглецю – відповідно 2,9 і 248 мг/м<sup>3</sup>; питома кількість пилу при масовому вибуху – 0,030 кг/м<sup>3</sup>.

Крім того, скористаємося результатами експериментальних досліджень вмісту фракції пилу у газопилових хмарах після масових вибухів у кар'єрах Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату (м. Кривий Ріг) [2] (табл. 1).

Таблиця 1

Вміст фракцій пилу у газопиловій хмарі після масового вибуху

Середній діаметр фракцій $d_{cp,i}$ , мкм	1 (0÷1,4)	3 (1,4÷4,2)	7 (4,2÷10)	13 (10÷15)	23 (15÷30)	38 (30÷45)	73 (45÷100)
Процентний вміст фракцій $n_i$ , %	10,67	11,24	12,46	14,15	15,88	17,37	18,24

Розрахунки за формулою (3) показують, що висота підйому фракцій пилу із середнім діаметром від 1 до 73 мкм змінюється у діапазоні відповідно від 0,11 до 26,211 м. При цьому час підйому фракцій пилу прямо пропорційний їх масі (або діаметру).

З формули (4) отримаємо, що середня концентрація пилу у хмарі дорівнює 1367 мг/м<sup>3</sup>.

Розрахунки за формулою (5) показують, що для заданого діапазону зміни діаметрів фракцій пилу величина їх концентрації змінюється у діапазоні відповідно від 145,86 до 249,34 мг/м<sup>3</sup>. Зростання концентрації при збільшенні діаметру фракції пилу пояснюється фізико-механічними властивостями гірської породи і відповідно особливостями її дроблення при детонації свердловинних зарядів ВР. У свою чергу процес дроблення залежить від потужності та форми заряду.

На рис. 2 наведено залежність концентрації фракцій пилу від висоти їх підйому на динамічній стадії формування газопилової хмари.

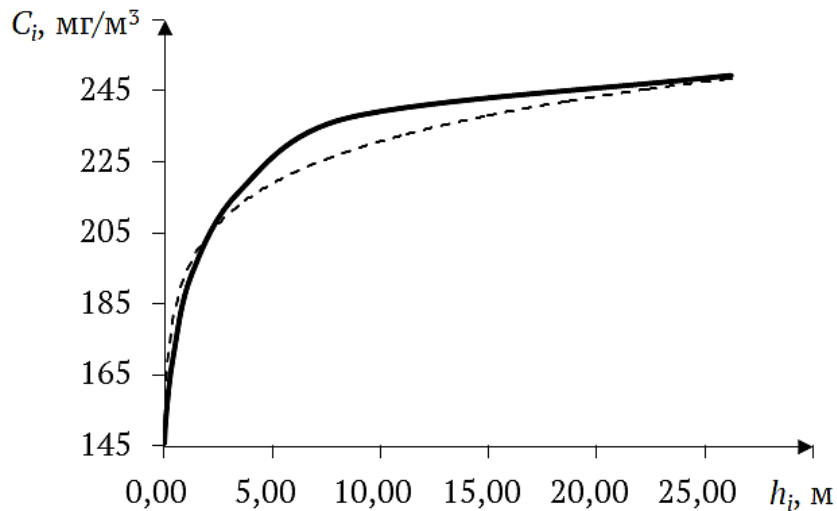


Рисунок 2 – Залежність концентрації фракцій пилу від висоти їх підйому:  
----- - крива регресії

Аналіз рис. 2 показує, що найбільш виражене збільшення концентрації фракцій пилу спостерігається в діапазоні висот їх підйому від 0,11 до 6 м. Згідно з формулою (3) це відповідає фракціям пилу із середнім діаметром від 1 до 31 мкм. Надалі спостерігається зниження інтенсивності зростання концентрації ( $31 < d_i \leq 73$  мкм).

Крива регресії на рис. 2 описується статичною залежністю з коефіцієнтом детермінації  $R^2 = 0,9556$

$$C_i = 193,53 h_i^{0,0765}. \quad (4)$$

**Висновки.** На динамічній стадії формування газопилової хмари висота підйому частинок пилу із середнім діаметром від 1 до 73 мкм змінюється у діапазоні від 0,11 до 26,211 м, а величина їх концентрації – у діапазоні від 145,86 до 249,34 мг/м<sup>3</sup>. Вміст фракцій пилу прямо пропорційний їх середньому діаметру. Це пояснюється фізико-механічними властивостями гірської породи і відповідно особливостями її дроблення енергією вибуху. Для вказаних вихідних даних найбільш виражене збільшення концентрації спостерігається для фракцій пилу діаметром від 1 до 31 мкм на висотах їх підйому від 0,11 до 6 м.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Babii K.V. Studying the impact of single blasts in open pits on the Air dustiness in the city of Krivyi Rih / K.V. Babii, L.A. Novikov, M.O. Batur // Geo-Technical Mechanics: Interdepartmental collection of scientific papers / Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine. – Dnipro, 2022. – no. 160. – P. 33-43. – URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2022.160.033>.
2. Способи і засоби підвищення екологічної безпеки масових вибухів в залізородних кар'єрах за пиловим чинником / В.Е. Колесник, А.А. Юрченко, А.А. Литвиненко, А.В. Павличенко. – Дніпропетровськ: Літограф, 2014. – 112 с.
3. Novikov L.A. Determination of the lifting height of dust particles after a mass explosion in an iron ore open pit / L.A. Novikov, K.S. Ishchenko, L.O. Lohvyna // Geo-Technical Mechanics: Interdepartmental collection of scientific papers / Institute of Geotechnical

Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine. – Dnipro, 2023. – no. 164. – P. 126-134. – URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2023.164.126>.

4. Exploratory investigation on the suppression efficiency of fugitive dust emitted from coal stockpile: Comparison of innovative atomizing and traditional spraying technologies / P. Yen, C. Yuan, J. Ceng, K. Chiang, Y. Tseng, K. Soong, M. Jeng // *Process Safety and Environmental Protection*. – vol. 154. – P. 348-359. –

URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.026>.

5. Юрченко А.А. Формування та розповсюдження пилової хмари після масового вибуху в залізорудному кар'єрі / А.А. Юрченко, Д.В. Кулікова // *Збірник наукових праць НГУ*. – 2018. – № 56. – С. 253-264. – URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/154056>.

6. Гурин А.А. О подъеме пылегазового облака под метательным воздействием взрывчатых веществ / А.А. Гурин, В.И. Деньгуб, Т.В. Деньгуб // *Гірничий вісник*. – 2016. – Вип. 101. – С. 162-164. – URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi\\_2016\\_101\\_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi_2016_101_37).

7. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines / Z. Huang, S. Ge, D. Jing, L. Yang // *Applied ecology and environmental research*. – 2019. – vol. 17. – Issue 5. – P. 10313-10333. – URL: [http://dx.doi.org/10.15666/aer/1705\\_1031310333](http://dx.doi.org/10.15666/aer/1705_1031310333).

8. Dispersion Pattern of Blasting Dust in Deep Open-Pit Mines / Z. Chen, C. Du, J. Wang, Y. Wang // *ACS Omega*. – 2023. – vol. 8. – Issue 34. – P. 31353–31364. – URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03528>.

9. Jones T. Richards. Primary blasting in a limestone quarry: Physicochemical characterization of the dust clouds / T. Jones, A. Morgan, R. Richards // *Mineralogical Magazine*. – 2003. – vol. 67. – Issue 2. – P. 153-162. –

URL: <https://doi.org/10.1180/0026461036720092>.

10. Jing Z. Simulated study of the blasting smog-dust movement on account of particle system / Z. Jing // *Journal of University of Science and Technology Beijing*. – 2007. – vol. 67. – Issue S2. – P. 25-29. – URL: <http://doi.org/10.13374/j.issn1001-053x.2007.s2.077>.

## REFERENCES

1. Babii K.V. Studying the impact of single blasts in open pits on the Air dustiness in the city of Krivyyi Rih / K.V. Babii, L.A. Novikov, M.O. Batur // *Geo-Technical Mechanics: Interdepartmental collection of scientific papers / Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine*. – Dnipro, 2022. – no. 160. – P. 33-43. – URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2022.160.033>.

2. Sposoby i zasoby pidvyshchennia ekolohichnoi bezpeky masovykh vybukhiv v zalizorudnykh karierakh za pylovym chynnykom / V.E. Kolesnik, A.A. Jurchenko, A.A. Litvinenko, A.V. Pavlichenko. – Dnipropetrovsk: Litohraf, 2014. – 112 p.

3. Novikov L.A. Determination of the lifting height of dust particles after a mass explosion in an iron ore open pit / L.A. Novikov, K.S. Ishchenko, L.O. Lohvyna // *Geo-Technical Mechanics: Interdepartmental collection of scientific papers / Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of NAS of Ukraine*. – Dnipro, 2023. – no. 164. – P. 126-134. – URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2023.164.126>.

4. Exploratory investigation on the suppression efficiency of fugitive dust emitted from coal stockpile: Comparison of innovative atomizing and traditional spraying technologies / P. Yen, C. Yuan, J. Ceng, K. Chiang, Y. Tseng, K. Soong, M. Jeng // *Process Safety and Environmental Protection*. – vol. 154. – P. 348-359. –  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.08.026>.
5. Yurchenko A.A. Formuvannia ta rozpovsiudzhennia pylovoi khmary pislia masovoho vybukhu v zalizorudnomu karieri / A.A. Yurchenko, D.V. Kulikova // *Zbirnyk naukovykh prats NHU*. – 2018. – no. 56. – P. 253-264. –  
URL: <https://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/154056>.
6. Gurin A.A. O pod"eme pylegazovogo oblaka pod metatel'nym vozdeystviem vzryvchatykh veshhestv / A.A. Gurin, V.I. Den'gub, T.V. Den'gub // *Hirnychiy visnyk*. – 2016. – issue 101. – P. 162-164. – URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi\\_2016\\_101\\_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/girvi_2016_101_37).
7. Numerical simulation of blasting dust pollution in open-pit mines / Z. Huang, S. Ge, D. Jing, L. Yang // *Applied ecology and environmental research*. – 2019. – vol. 17. – Issue 5. – P. 10313-10333. – URL: [http://dx.doi.org/10.15666/aer/1705\\_1031310333](http://dx.doi.org/10.15666/aer/1705_1031310333).
8. Dispersion Pattern of Blasting Dust in Deep Open-Pit Mines / Z. Chen, C. Du, J. Wang, Y. Wang // *ACS Omega*. – 2023. – vol. 8. – Issue 34. – P. 31353–31364. –  
URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03528>.
9. Jones T. Richards. Primary blasting in a limestone quarry: Physicochemical characterization of the dust clouds / T. Jones, A. Morgan, R. Richards // *Mineralogical Magazine*. – 2003. – vol. 67. – Issue 2. – P. 153-162. –  
URL: <https://doi.org/10.1180/0026461036720092>.
10. Jing Z. Simulated study of the blasting smog-dust movement on account of particle system / Z. Jing // *Journal of University of Science and Technology Beijing*. – 2007. – vol. 67. – Issue S2. – P. 25-29. – URL: <http://doi.org/10.13374/j.issn1001-053x.2007.s2.077>.

Received 15.09.2024.  
Accepted 18.09.2024.

### ***Changes in dust concentration in a gas-dust cloud during blasting in an iron ore pit***

*In open-pit extraction of minerals emit large amounts of harmful dust fractions and gas into the atmosphere. This leads to atmospheric pollution in open pit and sanitary protection zones. The largest dust emissions are observed during blasting operations in open pits. This is especially the cases when unfavorable meteorological conditions occur, means of dust suppression are not sufficiently effective, blasting technology was violated. Dust particles are known to be able to propagate long distances from the source of the explosion. Dust fractions up to 10  $\mu\text{m}$  diameter are the most dangerous, as they are the main risk factor for the development of chronic respiratory diseases. In particular, according to European standards, the average daily concentration of dust particles with a diameter between 2.5 and 10  $\mu\text{m}$  should not exceed 0.05  $\text{mg}/\text{m}^3$ .*

*The paper estimates mass concentrations of dust fractions in the gas-dust cloud at the dynamic stage of its formation after a mass explosion in an iron ore open pit. The following assumptions were made in the calculations: no influence of the temperature factor (ejected air flows); dust particles are spherical; flow of dust fractions by the gas flow follows the Stokes law. The ranges of variation of ascent height and mass concentrations of dust fractions*

*at the dynamic stage of gas-dust cloud formation are established. In particular, the lift height of the dust fraction is directly proportional to the value of the dynamic impulse. The difference in mass concentrations of dust fractions in the gas-dust cloud is due to the physical and mechanical properties of rocks destroyed by boreholes explosive substance charge. When determining the mass concentrations of dust fractions, the results of experimental studies were used, which were carried out in the open pit of Ingulec Mining and Processing Combine. The graphical dependence of average mass concentrations of dust fractions depending on the height of their ascent at the dynamic stage of gas-dust cloud formation is presented, the regression equation in the form of a degree function is obtained. The results of calculations have shown that the greatest intensity of mass concentration increase in the gas-dust cloud at the dynamic stage of its formation is characteristic of dust fractions with diameter up to 31  $\mu\text{m}$ . The intensity of growth of mass concentrations of larger dust fractions decreases markedly.*

**Яворська Олена Олександрівна** – д.т.н., доцент, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

**Новіков Леонід Андрійович** – к.т.н., науковий співробітник відділу геомеханічних основ відкритої розробки родовищ Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України.

**Іконніков Максим Юрійович** – к.т.н., доцент, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

**Yavorska Olena Oleksandrivna**, Doctor of Technical Sciences (Dr. habil. Tech.), Professor of the Department of Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology.

**Novikov Leonid Andriiovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D. Tech), Researcher in Department of Geomechanics of Mineral Opencast Mining Technology, the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the NAS of Ukraine.

**Ikonnikov Maksym Yuriyovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D. Tech), Professor of the Department of Labour Protection and Civil Safety, Dnipro University of Technology