

## Список літератури

1. Вілкул Ю.Г. Сучасний стан залізорудної галузі, прогноз розвитку та пропозиції / Ю.Г. Вілкул, А.А. Азарян, В. А. Колосов, Ф. І. Караманіць, А. С. Батарєєв // Качество минерального сырья. Сб. науч. тр., Кривой Рог: ФЛП Чернявский Д. А., 2017. – Т. 1, С. 9-24.
2. Ступнік М.І. Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу / М.І. Ступнік, М.Б. Федько, С.В. Письменний та ін // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2018. – Вип. 47, С. 3-8. DOI: [10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8](https://doi.org/10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8).
3. Sinchuk I., Budnikov K., Krasnopolsky R. Fundamentals of integrating smart technologies for controlling power systems at iron ore underground mining enterprises / Monograph. – Warsaw: PE Shcherbatykh A.V., 2021. – 127 s.
4. Закон України «Про ринок енергії» № 1931-IX від 02.12.2021, с. 103.
5. Sinchuk O. Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines / Sinchuk O., Sinchuk I., Beridze T., Filipp Y., Budnikov K., Dozorenko O., Strzelecki R. // Mining of Mineral Deposits, 2021. – Volume 15, Issue 4. – pp. 25-33. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.025>
6. Сінчук О.М. До проблеми створення синергетичних електроенергетичних комплексів з піковими гаєс на основі водовідливних систем залізорудних шахт / О.М. Сінчук, Ю.Б. Філіпп, І.О. Сінчук, О.Ю. Михайленко, К.В. Будніков, Р.І. Краснопольський // Гідроенергетика України, 2021. – №3-4, С. 83-89.
7. Sinchuk O.M., Woiko S.M., Sinchuk I.O. та ін. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems. Multi-authored monograph. – Warszawa: iScience Sp. z. o. o., 2018. – 77 p.
8. Wu T., Shieh S., Jang S., Liu C. Optimal energy management for a petrochemical plant under considerations of uncertain power supplies / IEEE Transactions on Power Systems, 2005. – 20(3), pp. 1431-1439. DOI: [10.1109/tpwrs.2005.852063](https://doi.org/10.1109/tpwrs.2005.852063)
9. Brand EL, Vosloo J., Mathews E. Automated energy efficiency project identification in the gold mining industry. Proceeding of the 13th Conference on the Industrial and Commercial use of Energy. 2015, pp. 17-22. DOI: [10.1109/ICUE.2015.7280241](https://doi.org/10.1109/ICUE.2015.7280241)
10. Mike Rycroft. Small pumped water storage systems: a new partner for renewable energy. Technology&business for development 2017. Електронний ресурс: URL: <https://www.ee.co.za/article/small-pumped-water-storage-systems-new-partner-renewable-energy.html>.
11. Бодяньський Є.В. Методи обчислювального інтелекту в системах керування технологічними процесами феросплавного виробництва / Бодяньський Є.В., Кученренко Є.І., Михальов О.І., Філатов В.О., Гасик М.М. // Монографія. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2011. – 420 с.
12. Мееров М.В. Многосвязные системы управления / М.В. Мееров, А.В. Ахметзянов, Я.М. Берщанский и др.; под ред. М.В. Меерова. – М.: Наука, 1990. – 264 с.
13. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование сложных систем. – К.: Вища школа, 1988 – 359 с.
14. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления; пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004 – 832 с.
15. Kupin A., Senko A. Principles of intellectual control and classification optimization in conditions of technological processes of beneficiation complexes / CEUR Workshop Proceedings 1356, 2015. – pp. 153-160

Рукопис подано до редакції 11.11.2021

УДК 622.794.4:621.3.025

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., С.О.КРАДОЖОН, аспірант  
Криворізький національний університет

### МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОМБІНОВАНОЇ СУШКИ ПРОДУКТІВ ЗБАГАЧЕННЯ ПРЯМИМ ВПЛИВОМ ЗМІННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

**Мета.** Метою даної роботи є розробка рекомендацій по промислового використання методу сушки тонкодисперсних продуктів збагачення.

**Методи дослідження.** У роботі використані методи математичного моделювання та математичної статистики при перевірці результатів теоретичних розрахунків, отриманих для визначення параметрів установки для комбінованої сушки тонкодисперсних матеріалів прямим впливом змінного електричного струму.

**Наукова новизна.** Вперше розроблений метод розрахунку конструктивних та технологічних параметрів сушальної установки тонкодисперсних продуктів збагачення пропусканням змінного електричного струму.

**Практична значимість.** При мокрих процесах збагачення корисних копалин виникає необхідність зневоднення тонкодисперсних продуктів (концентратів, хвостів, шламів). При цьому існуючі методи зневоднення не завжди можуть забезпечити необхідну кінцеву вологість таких продуктів, або мають високі енергетичні затрати і шкідливі для екології, як наприклад термічна сушка. Існують проблеми, пов'язані з будовою парового середовища осадів, так як дослідження його являє собою складну задачу. Найбільші труднощі виникають при сушці шламових осадів, які

мають високорозвинену поверхню частинок, і обумовлені наявністю капілярних явищ, а також особливими властивостями рідини в тонких каналах. Це спонукає до розробки нових ефективних методів зневоднення тонкодисперсних продуктів збагачення. Одним з таких методів є комбінований спосіб сушки прямим впливом змінного електричного струму. Але до сього часу не була розроблена методика розрахунку конструктивних та технологічних параметрів для проектування установки, яка реалізує цей спосіб. Тому розробка методики розрахунку установки для комбінованої сушки прямим впливом змінного електричного струму, яка дозволяють забезпечити раціональні параметри зневоднення тонкодисперсних матеріалів має високу практичну значимість.

**Результати.** Розроблена методика для розрахунку конструктивних та технологічних параметрів сушильної установки для зневоднення продуктів збагачення внутрішніми джерелами теплоти в умовах електричного нагріву комбінованим способом. Це дозволяє визначити раціональні параметри сушильної установки для забезпечення найкращих показників енергоефективності та екологічності.

**Ключові слова:** сушильні установки, енергоефективність, тонкодисперсні матеріали, методика.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-126-131

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** При роботі агломераційних фабрик утворюється значна кількість шламів. Вони складаються з частинок шихти та готового агломерату, які були затримані системою газоочистки та змиті водою в скруберах. Зазвичай після відстоювання в шламонакопичувачах та попереднього зневодження на складах вони додаються в склад агломераційної шихти для повторного використання. Але досить висока та нестабільна вологість шламів (в середньому від 18 до 29%) призводить до порушення технологічного процесу та вимушує збільшувати вміст палива (кокса) в складі шихти.

Використання для зневоднення агломераційних шламів барабаних, дискових та пресфільтрів, часто неможливо за наявністю в складі шламів як дуже дрібних фракцій так і досить великих. Використання на деяких підприємствах стрічкових вакуум-фільтрів не дає достатнього зниження вологи. Застосування для зневоднення шламів термічної сушки пов'язано з значними капітальними затратами, витратами палива, необхідністю наявності додаткової системи пилогазоочистки та забрудненню оточуючого середовища.

Це спонукає до розробки та впровадженню нових методів зневоднення тонкодисперсних продуктів збагачення.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Питання сушки тонкодисперсних матеріалів широко висвітлені в роботах: А. В. Ликов [5, 6], О. В. Заміцький [7, 8], Б. С. Сажин [9], В. Ф. Фролов [10] та ін.

При сушці тонкодисперсних матеріалів важливою проблемою є забезпечення екологічної та виробничої безпеки сушильних установок. У статті [7] були розглянуті сучасні методи сушки тонкодисперсних матеріалів, встановлено, що найбільш перспективним є метод сушіння за допомогою електричного струму. Електричний струм пропускають через шар вологого матеріалу. При цьому матеріал приводять в контакт з електродами, які включені безпосередньо в електричний ланцюг.

У статті [8] була розроблена математична модель тепло- та масообміну в процесі сушки капілярно-пористого матеріалу шляхом пропускання електричного струму через шар вологого матеріалу, що дозволило отримати розрахункові залежності та встановити раціональні параметри сушильної установки.

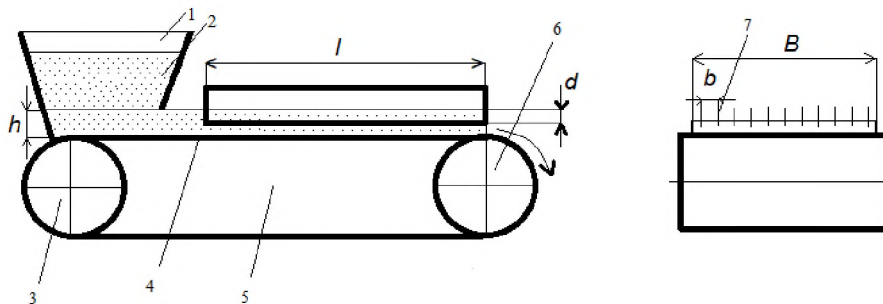
**Постановка задачі.** На основі проведених досліджень був запропонований метод, який полягає в підвищенні продуктивності процесу сушки і зниженні його енергоємності, за рахунок впливу електричним струмом тільки на поверхневий шар матеріалу, а пари що утворюються створюють надлишковий тиск в цьому зоні пароутворення, що призводить до видалення (витискання) вологи в зоні фільтрації [7]. Використовуючи даний спосіб, видалення вологи відбувається комбіновано. Такий комбінований вплив електричного струму і надлишкового тиску парів дозволяє отримати велику інтенсивність зневоднення при мінімальній енергоємності процесу. Поставлена мета досягається тим, що зневоднюючий агрегат містить електроди пластинчастої форми, які встановлені над матеріалом, що зневоджується і мають можливість контакту з ним шляхом занурення, а над електродами встановлений герметичний кожух.

При підключенні напруги до електродів відбувається резистивний нагрів капілярної вологи і її пароутворення внутрішніми джерелами теплоти. При цьому виникає підвищений тиск в шарі матеріалу між електродами, за рахунок чого крапельна волога фільтрується через шар

тонкодисперсного матеріалу, що знижує енерговитрати, але на даний час відсутня методика розрахунку таких установок.

Метою даної статті є розробка методики розрахунку конструктивних параметрів установки для сушки тонкодисперсних матеріалів комбінованим методом зневоднення з пропусканням електричного струму через матеріал.

**Викладення матеріалу та результати.** Розрахунок конструктивних параметрів сушильної установки (рис. 1).



**Рис. 1.** Конструктивна схема установки для зневоднення продуктів збагачення внутрішніми джерелами теплоти в умовах електричного нагріву: 1 – бункер, 2 – матеріал, 3 – натяжний барабан, 4 – перфорована стрічка, 5 – стрічковий живильник, 6 – приводний барабан, 7 – електроди,  $l$  – довжина електродів;  $b$  – відстань між електродами;  $d$  – глибина занурювання електродів;  $h$  – висота шару матеріалу;  $B$  – ширина шару матеріалу на стрічці.

Основними параметрами робочої зони є довжина електродів і відстань між електродами.

Вихідні дані: продуктивність установки  $G$ , т/год, початкова і кінцева вологість матеріалу  $u_0, u$ , %.

Довжина робочої зони, м

$$l = v\tau,$$

де  $v$  – швидкість руху стрічки, м/с;  $\tau$  – час, протягом якого матеріал повинен бути підданий сушінню, с.

Відстань між електродами, м

$$b = \frac{U}{E},$$

де  $U$  – напруга, В;  $E$  – напруженість електричного поля, В/м ( $E = 6,5-8,5$  – по результатам попередніх досліджень).

Глибина занурювання електродів, м

$$d = zh,$$

де  $z$  – ступінь занурення електродів, м, по результатам попередніх досліджень для шламів аглофабрик, приймається  $z = 0,6$ .

Продуктивність установки, т/год

$$G = 3600Bhv\gamma_n,$$

де  $G$  – продуктивність, т/год;  $B$  – ширина шару матеріалу на стрічці, м;  $h$  – висота шару матеріалу, м;  $\gamma_n$  – насипна маса матеріалу, т/м<sup>3</sup>.

Так як ширина шару матеріалу  $B$  дорівнює сумі всіх відстаней між електродами  $b$ , то

$$B = b(n-1),$$

де  $b$  – відстань між сусідніми електродами, м;  $n$  – число електродів.

Таким чином, формула для розрахунку продуктивності сушильної установки приймає наступний вигляд

$$G = 3600hv\gamma_nb(n-1).$$

Повірочний розрахунок.

Проводиться з метою перевірки відповідності кінцевої вологи продуктів, що зневоджуються.

Початкові дані:  $t_0$  – початкова температура пластини, °С;  $t_c$  – температура оточуючого середовища, °С;  $u_0$  – початкова вологість пластини, %;  $t_m$  – температура по мокрому термометру, °С;  $t_k$  – температура пластини після сушки, °С;  $x$  – точка визначення вологості в пластині;  $\rho$  – радіус меніска капіляру, м;  $2\delta = B$  – ширина шару, м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·град;

$\rho_0$  – щільність сухого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $l$  – довжина пластини, м;  $h$  – висота пластини, м;  $U$  – напруга, В;  $\rho_{el}$  – питомий електричний опір, Ом·м;  $\tau$  – час визначення вологості в пластині, с.

Для розрахунку кінцевої вологості матеріалу використовуємо наступний алгоритм:  
ізохорна питома теплоємність, Дж/моль·К

$$c_v = (1 - u_0)c_{v1} + u_0c_{v2},$$

де  $c_{v1}$  та  $c_{v2}$  – ізохорна теплоємність матеріалу та води;  
потужність внутрішніх джерел теплоти, Вт/м<sup>3</sup>

$$Q_v = \frac{Q}{V},$$

де  $V = lBh$  – об'єм матеріалу між електродами, м<sup>3</sup>

$$Q = \frac{U^2}{R},$$

$$R = \rho_{el} \frac{l}{f},$$

$$f = hB,$$

після підстановки отримуємо

$$Q_v = \frac{U^2}{\rho_{el} l};$$

коефіцієнт температуропровідності, Вт/м·град

$$a = \frac{\lambda}{c_v \rho_0};$$

коефіцієнт дифузії рідини, м<sup>2</sup>/с

$$a_{m2} = D_0 \cdot \left( \frac{273 + t_{sr}}{273} \right)^{1.8},$$

де  $D_0$  – коефіцієнт дифузії при нормальних умовах,  $t_{sr}$  – середня температура пластини;  
коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м<sup>2</sup>·град

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{\bar{v}}}{2\delta},$$

де  $Nu$  – число Нусельта;

$$Nu = 0.75(Gr \cdot Pr)^{0.25},$$

де  $Gr$  – число Грасгофа;

$$Gr = \frac{g(2\delta)^3}{\nu^2} \beta_1 (t_{sr} - t_0),$$

де  $\beta_1$  – коефіцієнт температурного розширення, К<sup>-1</sup>;  $Pr$  – число Прандтля;

$$Pr = \frac{\nu}{a_1},$$

де  $a_1$  – коефіцієнт температуропровідності повітря,

$$a_1 = \frac{\lambda_1}{c_1 \rho_1};$$

інтенсивність масообміну, кг/м<sup>2</sup>·с

$$q_2 = \beta \cdot \Delta p,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення;

$$\beta = \frac{Nu_D a_{m2}}{2\delta},$$

де  $Nu_D$  – число Нусельта дифузійне;

$$Nu_D = 0.75(Gr_D Pr_D)^{0.25},$$

де  $Gr_D$  – число Грасгофа дифузійне;

$$Gr_D = \frac{\Delta p}{\rho_6} \cdot \frac{g(2\delta)^3}{v^2},$$

де  $\Delta p$  – різниця парціальних тисків пару [11];

$$\Delta p = \frac{p_1 - p_2}{R \cdot T_{sr}};$$

$$lgp_1 = \frac{8.12 \cdot t_{sr} + 156}{t_{sr} + 236}; \quad lgp_2 = \frac{8.12 t_m + 156}{t_m + 236};$$

$$p_1 = 133.3210^{lgp_1}; \quad p_2 = 133.3210^{lgp_2},$$

де  $Pr_D$  – число Прандтля дифузійне;

$$Pr_D = \frac{v}{a_{m2}};$$

відносний коефіцієнт термодифузії, кг/кг·град

$$\delta_2 = \frac{-\Delta c}{1000 \Delta T} \cdot \frac{1}{d_1(1-d_1)},$$

де  $\Delta T$  – різниця початкової температури с температурою мокрого термометра;

$$\Delta T = t_0 - t_m,$$

де  $\Delta c$  – різниця вологовмісту повітря;

$$\Delta c = d_1 - d_2;$$

$$d_{1,2} = \frac{0.622 p_{1,2}}{10^5 - p_{1,2}};$$

число Біо

$$Bi = \frac{a\delta}{\lambda};$$

коефіцієнт  $\mu_n$  визначається в залежності від числа Біо; кінцева вологість матеріалу [8], %;

$$u(x, \tau) = u_0 - \delta_2 \frac{\sqrt{a_{m2}}}{a_{m2} - a} \left( t_c - t_0 - \frac{\rho q_2}{\alpha} \right) \cdot 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{\sqrt{a} \frac{(\sin \mu_n)}{\sin(\sqrt{\frac{a}{a_{m2}}}) \mu_n} \cos(\mu_n) \sqrt{\frac{a}{a_{m2}}} \frac{x}{\delta} - \sqrt{a_{m2}} \cos(\mu_n) \frac{x}{\delta}} \right] \times$$

$$\times \frac{\sin(\mu_n)}{\mu_n + \cos(\mu_n) \sin(\mu_n)} e^{-\mu_n^2 \frac{a}{\delta^2} \tau} - \delta_2 \frac{\sqrt{a_{m2}}}{a_{m2} - a} \frac{Q_v}{c_v \rho_0} \left[ \frac{a - a_{m2}}{a \sqrt{a_{m2}}} \left( x^2 - \frac{\delta^2}{2} \right) + \frac{\delta^2}{a} \times \right.$$

$$\left. \times 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{\sqrt{a} \frac{\sin(\mu_n)}{\sin(\sqrt{\frac{a}{a_{m2}}}) \mu_n} \cos(\mu_n) \sqrt{\frac{a}{a_{m2}}} \frac{x}{\delta} - \sqrt{a_{m2}} \cos(\mu_n) \frac{x}{\delta} \right] \times \right.$$

$$\left. \times \frac{\sin(\mu_n)}{\mu_n^2 (\mu_n + \cos(\mu_n) \sin(\mu_n))} e^{-\mu_n^2 \frac{a}{\delta^2} \tau} \right] - \frac{q_2}{\sqrt{a_{m2}} \rho_0} \left[ \frac{\sqrt{a_{m2}}}{\delta} \tau + \frac{1}{2\delta \sqrt{a_{m2}}} \left( x^2 - \frac{\delta^2}{2} \right) \right].$$

Відносна похибка розраховується за формулою

$$\Delta = \frac{u - u_{розр}}{u}.$$

Середнє відхилення повинно не перевищувати 12%.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** В результаті проведених досліджень розроблена методика розрахунку конструктивних та технологічних параметрів сушильної установки тонкодисперсних продуктів збагачення комбінованим способом.

В подальшому планується проведення досліджень для зниження питомих витрат електроенергії при зневодненні тонкодисперсних матеріалів з використанням комбінованого методу сушки прямим впливом змінного електричного струму.

#### Список літератури

1. Ребиндер П.А. // В кн.: Всесоюзное научно-техническое совещание по интенсификации процессов сушки. М: Профиздат, 1958. С. 14.
2. Лукин Б.Н., Курочкина М.И. Очистка вентиляционных выбросов в химической промышленности. Л.: Химия. 1980. 232с.
3. В.И. Мухтаев, В.М. Ульянов / Сушка дисперсных материалов – 51 с.
4. С.О. Поляшенко, О.В. Єсіпов, М.Л. Шуляк / ОСНОВИ ТЕПЛООБМІНУ Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2020.
5. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности / Лыков М.В. // М. : Химия, 1970. – 429 с
6. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / Лыков А.В. , Михайлов Ю.А. // М. : Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.
7. Замницький О. В. Інноваційні технології в процесі сушки тонкодисперсних матеріалів / О. В. Замницький, Н. В. Бондар, С. О. Крадожон // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2019. – Вип. 48. – С. 83–88. – Бібліогр.: 15 назв. – DOI: 10.31721/2306-5451-2019-1-48-83-88
8. Mathematical model of the process of drying fine dispersed materials under the influence of alternating electric current / O. V. Zamytskyi, N. O. Holiver, N. V. Bondar, S. O. Kradozhon // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2021. – No. 3. – P. 51–56. – DOI: 10.33271/nvngu/2021-3/051.
9. Сажин Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин // М.: Наука. – 1997. – 448 с.
10. Фролов В.Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / Фролов В.Ф. // Л.: Химия. - 1987.- 208 с.
11. Нестеренко А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха.–М.: Высшая школа, 1974.–460 с.

Рукопис подано до редакції 12.11.2021

УДК 622.235:622.271

Д.Ю. МАЛИХ, інж., Д.А. ТИТОВ, магістрант, Г.І. ЄРЕМЕНКО, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

## ЕНЕРГЕТИЧНО-КОНСТРУКТИВНА АНАЛІТИКА АДАПТАЦІЇ МЕРЕЖ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ ДО ПІДРИВАННЯ МАСИВІВ СКЛАДНОЇ СТРУКТУРИ

**Мета.** Основною метою досліджень є визначення максимально можливої адаптації свердловинних зарядів ВВ до особливостей будови масивів гірських порід для більш ефективного руйнування шляхом розосередження частин заряду вздовж свердловини та забезпечення кумулятивної дії цих частин.

**Методи дослідження** полягають в аналізі геологічних даних про залізорудні родовища Кривбасу, проектною документації, виробничих даних гірничодобувних підприємств, наукових теорій та публікацій з подальшим їх узагальненням і формулюванням розроблених положень. Оригінальність полягає у застосуванні комплексного підходу щодо вирішення поставленої проблеми та ряду власних технічних рішень.

**Наукова новизна** полягає у дослідженні впливу зміни конструкції і параметрів розосереджених свердловинних зарядів ВР на інтенсивність руйнування розташованих нижче породних масивів.

**Практична значимість** роботи полягає в розробці нових конструкцій свердловинних зарядів і методики визначення їх параметрів та застосування.

**Результати.** Було здійснено дослідження взаємозв'язку геолого-технологічних умов і динамічних процесів, в яких здійснюється вибухове руйнування кристалічних порід за допомогою взаємодіючих свердловинних зарядів, конструкції яких розроблені авторами. Це дало змогу встановити раціональні режими розподілу енергії вибуху в скельному масиві при формуванні свердловинних зарядів з використанням коефіцієнта  $m = 0,025f$  лінійної диференціації їх частин, що зменшує зону хаотичних пгучних структурних порушень нижнього уступу під дією вибуху, яка переважно є нерегульованою. Розроблений метод відрізняється від відомих насамперед тим, що окремі частини зарядів формуються з кумулятивними радіальними елементами. Таким чином максимальна адаптація зарядів до особливостей структурно-міцнісних характеристик масиву по висоті уступу досягається за рахунок розосередження частин заряду, а азимутальна – орієнтацією кумулятивних векторів останніх. Подальша розробка та виробниче за-