

УДК 681.5.015.23:681.5.015.24  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/16>

**Кондратець В.О.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Мелешко Є.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Мацуї А.М.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Абашина А.А.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## СТАБІЛІЗАЦІЯ ОПТИМАЛЬНОГО РІЗНОРОЗМІРНОГО КУЛЬОВОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО МЛИНА РЕАЛІЗАЦІЄЮ АЛГОРИТМІВ ОЦІНЮВАННЯ ЙОГО СТАНУ

*В наслідок низького значення к.к.д. кульових млинів, особливо в перших стадіях рудопідготовки на збагачувальних фабриках, продуктивність подрібнення сировини є порівняно низькою. Вихід з цієї ситуації можливо відшукувати в удосконаленні керованого об'єкта – кульового млина в частині його молочного середовища та у переведенні системи на сучасний інформаційний рівень. Дослідження здійснені в межах виконання теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах», яка входить до наукової тематики Центральноукраїнського національного технічного університету. Тому тема статті є актуальною. Метою даної роботи є підвищення продуктивності кульового млина першої стадії рудопідготовки на збагачувальних фабриках. При виконанні досліджень використано метод порівняння, аналізу, методи теорії кульових млинів, теорії автоматичного управління, інформатики, програмування, складання алгоритмів. Запропоновано спосіб автоматичного визначення кульового завантаження барабанних млинів і математичну модель оцінювання спрацювання куль за витратою енергії на подрібнення заданого обсягу руди, яка відрізняється достатньо високою точністю. Розроблена математична модель у вигляді 15 алгебраїчних залежностей для визначення кількості різнорозмірних куль у циклі завантаження їх у млин. Розроблено алгоритм визначення кількості різнорозмірних куль у циклі довантаження та алгоритмічну схему виконання операцій завантаження куль у млин. Запропоновані дві математичні моделі і два алгоритми дозволяють створити систему стабілізації оптимального багаторозмірного кульового завантаження нового типу. Система стабілізації оптимального кульового завантаження в млині, яку можливо створити на базі виконаних досліджень, в процесі експлуатації дозволяє реалізувати переваги розробленого прогресивного молочного середовища. Практична значущість проведених досліджень міститься у значному до 95,44% підвищенні продуктивності подрібнення сировини та економії електроенергії і матеріальних ресурсів.*

**Ключові слова:** млин, оптимальне різнорозмірне кульове завантаження, стабілізація, алгоритми, довантаження.

**Постановка проблеми.** Продуктивність подрібнення сировини кульовими млинами на рудозбагачувальних фабриках є порівняно низькою. Підвищення показника потребує переведення системи керування кульовим завантаженням на сучасний інформаційний рівень. Дані дослідження здійснені в межах реалізації теми «Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах» (0115U003942), яка є складовою плану наукової

тематики Центральноукраїнського національного технічного університету. З врахуванням сказаного тема запропонованої наукової статті є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Починаючи з 70-х років минулого століття проблему керування кульовим завантаженням млинів розв'язують різними шляхами. Одним з перших використано принцип тимчасового керування, який застосовують і в теперішній час. При цьому певна кількість куль завантажується в млин через

встановлений інтервал часу – здебільшого через добу. Певна ефективність досягається при стабілізації вихідного живлення рудою. Якщо рудна продуктивність змінюється, то використовують принцип слідкування за кількістю подрібненої руди. Однак ці два підходи не забезпечують необхідну точність підтримання обсягу кульового завантаження. Згодом завантаження куль в млини почали здійснювати за енергетичними параметрами приводного електродвигуна – спочатку використовували засоби контролю активного струму статора електродвигуна кульового млина, згодом активної потужності. В цей же час розроблялися засоби керування з іншими підходами, які не забезпечили очікуваного ефекту. Удосконалювати продовжили пристрої, що базуються на вимірюванні активної потужності приводних двигунів [1–3], однак це не дало суттєвого підвищення точності вимірювання кульового завантаження. Сам принцип визначення завантаження кульового млина кулями не відрізняється високою точністю у випадку вимірювання активної потужності. Похибка оцінювання параметра складає 10-25 % [4].

Інший шлях оцінювання активної потужності – це використання відомої формули потужності для її визначення розрахунковим підходом. Наприклад, для водоспадного режиму роботи кульового млина можливо використати залежність (159), яку приведено в [5, с.296]. Однак цей параметр дуже точно отримати не можливо внаслідок зміни маси куль, ступеню заповнення барабана молотильними тілами, внутрішнього діаметра барабана, швидкості його обертання відносно критичного значення і сталості, яка визначається відношенням радіусів зовнішнього та внутрішнього радіусів руху куль у барабані. Крім того, до даної формули потужності не входять параметри руди – міцність, об'єм, крупність. Ця ж формула значно завищує значення потужності в наслідок того, що при падінні кульового завантаження відбувається «віддача» частини енергії на обертання барабана технологічного агрегату. Частку загальної енергії, що складає «віддачу» точно встановити не вдається. З розглянутого видно, що цей підхід також має велику похибку визначення обсягу кульового завантаження млина.

Отже, в теперішній час не існує альтернативи недосконалому часовому принципу керування станом кульового завантаження млинів першої стадії рудопідготовки збагачувальних фабрик і його вимушені застосовувати, втрачаючи продуктивність, перевитрачаючи електроенергію,

куль і футерівку. Тому задача удосконалення контролю та керування станом кульового завантаження млинів є актуальною і потребує подальшого дослідження.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є підвищення продуктивності кульового млина першої стадії рудопідготовки на збагачувальних фабриках шляхом переведення системи керування кульовим завантаженням на сучасний інформаційний рівень.

**Виклад основного матеріалу.** Відомо, що різнорозмірне кульове завантаження забезпечує суттєве зростання продуктивності кульового млина, яка може досягати 10-15%. Оскільки є і інші фактори впливу на продуктивність технологічного агрегату з боку молотильного середовища, то можливо вести мову про оптимальне різнорозмірне кульове завантаження. Один з його варіантів може бути таким: вміст куль діаметром 50 мм (18%), 65 мм (23%), 75 мм (27%), 90 мм (32%).

При роботі кульового млина оптимальне різнорозмірне кульове завантаження необхідно зберігати автоматичною стабілізацією його обсягу і складу. Встановлено, що відомі підходи підтримання заданого кульового завантаження в млинах не відповідають технологічним вимогам. Тому розв'язати цю задачу можливо реалізацією запропонованого більш ефективного підходу стабілізації кульового завантаження за корисно витраченою енергією, яка враховує всі показники процесу подрібнення руди і на неї не впливають збурюючі фактори, що роблять таку операцію нездійсненною. Тут доцільно перейти до віртуального оцінювання стану оптимального кульового завантаження за відомою в теорії кульових млинів залежністю корисно витраченої енергії на подрібнення певного обсягу руди, яка може слугувати математичною моделлю [6]. Новий, прогресивний підхід оцінювання стану молотильного середовища кульового млина захищено патентом на винахід № 122994 на «Спосіб автоматичного визначення кульового завантаження барабанних млинів» [7]. Він відрізняється тим, що попередньо вимірюють миттєві значення витрати вихідної руди, середньозважених крупностей вихідної руди і продукту у розвантаженні кульового млина, інтегрують їх значення впродовж часу набору заданого значення кількості руди, осереднені середньозважені крупності продуктів переводять у середні геометричні зважені крупності, витрачену енергію на подрібнення руди визначають за формулою

$$E = A \cdot K_{\phi} \left( \frac{1}{d_{cr}} - \frac{1}{D_{cr}} \right) Q_3, \text{ кВт}\cdot\text{г}, \quad (1)$$

де  $A$  – незмінний для даних умов подрібнення коефіцієнт;  $K_{\phi}$  – коефіцієнт, що враховує частку спрацювання футеровки порівняно зі зносом куль, що визначають експериментально;  $d_{cr}$ ,  $D_{cr}$  – відповідно середні гармонічні зважені крупності матеріалу в розвантаженні млина і вихідному живленні рудою;  $Q_3$  – задане значення набору маси подрібненої руди, а кульове завантаження млина знаходять як різницю оптимального значення і витраченої на подрібнення встановленого обсягу руди енергії, поділеної на норматив витраченої енергії на спрацювання одиниці маси куль в установленому режимі подрібнення в тому ж технологічному агрегаті на тому ж технологічному різнотипі руди, який визначають експериментально.

Даний підхід автоматичного визначення кульового завантаження барабанних млинів порівняно з відомим відрізняється високою точністю знаходження технологічного показника, оскільки в ньому замість визначення абсолютного значення кульового завантаження за активною потужністю електроприводу млина в точці екстремуму, де низька чутливість до кількості куль, а потужність вимірюється з низькою точністю, знаходиться з високою точністю корисно витрачена енергія на подрібнення заданої кількості матеріалу, враховуючи, що в запропонованій залежності  $A$  і  $K_{\phi}$  є константами, витрата руди вимірюється конвеєрними вагами з відносною похибкою менше  $\pm 1\%$ , а крупності в даних умовах визначаються також з достатньо високою точністю завдяки стабілізації параметрів осереднення випадкових сигналів впродовж тривалого часу, що складає не менше однієї години. Пристроями вимірюється середньозважена крупність вихідної руди і розвантаження кульового млина, а в математичну модель  $E$  входять середні гармонічні зважені крупності матеріалів. Відомо, що між цими крупностями існує аналітичний зв'язок. Він не є функціональним, оскільки визначається характеристикою крупності сипкого матеріалу. Однак в межах конкретного сипкого матеріалу, наприклад вихідної руди, пісків механічного односпірального класифікатора, розвантаження кульового млина, зливу односпірального класифікатора при певному технологічному різнотипні руди і обладнанні це буде практично функціональна залежність [8]. Існуючий кореляційний зв'язок, майже функціональний, між цими параметрами підтверджено в промислових експериментах даної технологічної схеми [9]. Отже, висока точність запропонованого підходу є гарантованою.

Запропонована математична модель (1) визначення величини корисно витраченої енергії на подрібнення руди в кульовому млині дозволяє дещо спростити підхід довантаження куль і підвищити точність, оскільки енергетичний показник витрати куль є самим стійким. Корисно витрачена енергія на подрібнення руди передбачає певне спрацювання куль в даному процесі. Вона не залежить від крупності матеріалу, а спрацювання куль залежить від їх розміру.

Використовуючи енергетичний параметр в експерименті спрацювання куль можливо визначити навіть за одну добу. При цьому необхідно кульовий млин з новою футерівкою і нормативним оптимальним різнорозмірним кульовим завантаженням жити певним технологічним різнотипом руди встановленої крупності впродовж доби, витримуючи задане розрідження пульпи. Після такого спрацювання куль знаходять загальну масу порожнього барабана, кульового завантаження і масу куль різного розміру. Використовуючи значення цих мас до експерименту, визначають спрацювання куль  $\Delta G_E$ , футерівки  $\Delta G_{\phi}$ , подрібнюючих тіл у кожному класі крупності –  $\Delta G_{E1}$ ,  $\Delta G_{E2}$ ,  $\Delta G_{E3}$  і  $\Delta G_{E4}$ . Віднісши ці дані до кількості  $E$  витраченої енергії визначають питомі витрати кульового матеріалу на 1 кВт·г корисно витраченої енергії, отримуючи конкретні дані –  $\Delta q_k = \Delta G_E / E$ , кг/т;  $\Delta q_{\phi} = \Delta G_{\phi} / E$ ;  $\Delta q_{E1} = \Delta G_{E1} / E$ ;  $\Delta q_{E2} = \Delta G_{E2} / E$ ;  $\Delta q_{E3} = \Delta G_{E3} / E$ ;  $\Delta q_{E4} = \Delta G_{E4} / E$ . Визначені питомі витрати кульового матеріалу і матеріалу футерівки будуть незмінними в процесі експлуатації, оскільки технологічний різнотип руди і матеріали та технології виготовлення куль і футерівки не змінюються. Відомо, що спрацювання футерівки млина залежить від крупності куль, однак в умовах стабілізації оптимального молольного середовища такий фактор впливати не буде.

Кулі в млин додавати бажано достатньо часто, наприклад через годину. Враховуючи математичну модель (1) цикл завантаження повинен дорівнювати певній кількості поданої в технологічний агрегат руди, наприклад 165 т, що наближено відповідає для даного кульового млина одній годині роботи. Разом з початком відліку маси руди, що завантажується у кульовий млин, необхідно здійснювати відлік середньозваженого розміру вихідної руди і розвантаження кульового млина. Відліки припиняють за сигналом конвеєрних вагів при досягненні 165 т. За кількістю виконаних вимірів знаходять осереднені значення  $d_{cr}$  розвантаження кульового млина і  $D_{cr}$  вихідної руди. Відповідно запропонованій математичній моделі (1)

за  $d_{CP}$ ,  $D_{CP}$  і  $Q_3$  знаходять кількість корисно витраченої енергії на подрібнення  $Q_3=165$  т руди з  $d_{CP}$  і  $D_{CP}$ . Потім визначають масу спрацьованих куль

$$\Delta G_E = \Delta q_k \cdot E \quad (2)$$

та їх спрацювання за розмірами

$$\Delta G_{E1} = \Delta q_{E1} \cdot E, \quad (3)$$

$$\Delta G_{E2} = \Delta q_{E2} \cdot E, \quad (4)$$

$$\Delta G_{E3} = \Delta q_{E3} \cdot E, \quad (5)$$

$$\Delta G_{E4} = \Delta q_{E4} \cdot E. \quad (6)$$

Аналогічно знаходять масу спрацьованої футеровки

$$\Delta G_\phi = \Delta q_\phi \cdot E, \quad (7)$$

а масу спрацьованої футерівки, яку необхідно замінити кулями, знаходять за виразом  $\Delta G_{\phi1} = \phi \cdot \Delta G_\phi$ . У загальному випадку ще буде виведено з кульового млина скрап  $\Delta G_C$ . Він також створений з усіх спрацьованих куль, але повністю не переніс свою масу на корисну роботу. Тому його також необхідно замінити різнорозмірними кулями.

В цілому різнорозмірними кулями необхідно замінити результуючу масу спрацьованого металу на корисно витрачену енергію при подрібненні  $Q_3$  руди. Маса спрацьованого металу буде дорівнювати

$$G_{PCM} = \Delta G_E + \Delta G_{\phi1} + \Delta G_C. \quad (8)$$

Результуюча спрацьована маса металу з заданим розміром куль розподілиться відповідно їх вмісту в оптимальному кульовому завантаженні

$$G_{50} = 0,18G_{PCM}, \quad (9)$$

$$G_{65} = 0,23G_{PCM}, \quad (10)$$

$$G_{75} = 0,27G_{PCM}, \quad (11)$$

$$G_{90} = 0,32G_{PCM}. \quad (12)$$

Кількість куль, які повинні ввійти в цикл завантаження, дорівнює

$$n_{50} = G_{50}/0,510 + \Delta G_{50}, \quad (13)$$

$$n_{65} = G_{65}/1,121 + \Delta G_{65}, \quad (14)$$

$$n_{75} = G_{75}/1,722 + \Delta G_{75}, \quad (15)$$

$$n_{90} = G_{90}/2,976 + \Delta G_{90}, \quad (16)$$

де 0,510; 1,121; 1,722; 2,976 – відповідно маси куль 50 мм, 65 мм, 75 мм і 90 мм в кг;  $\Delta G_{50}$ ,  $\Delta G_{65}$ ,  $\Delta G_{75}$ ,  $\Delta G_{90}$  – залишки маси, які менші маси однієї повної кулі і які необхідно врахувати в наступному циклі.

Отримані залежності (2)–(16) складають математичну модель знаходження кількості завантажуваних куль у циклі після подрібнення встановленої маси руди  $Q_3$ . Математична модель дозволяє

побудувати алгоритм визначення кількості різнорозмірних куль у циклі довантаження. Він приведений на рис. 1. Алгоритмічну схему виконання операцій завантаження куль у млин наведено на рис. 2. Вона побудована на базі алгоритму, розглянутому на рис. 1, і дозволяє створити інформаційно-керуючий блок завантаження у млин різнорозмірних куль на заміну спрацьованого металу.

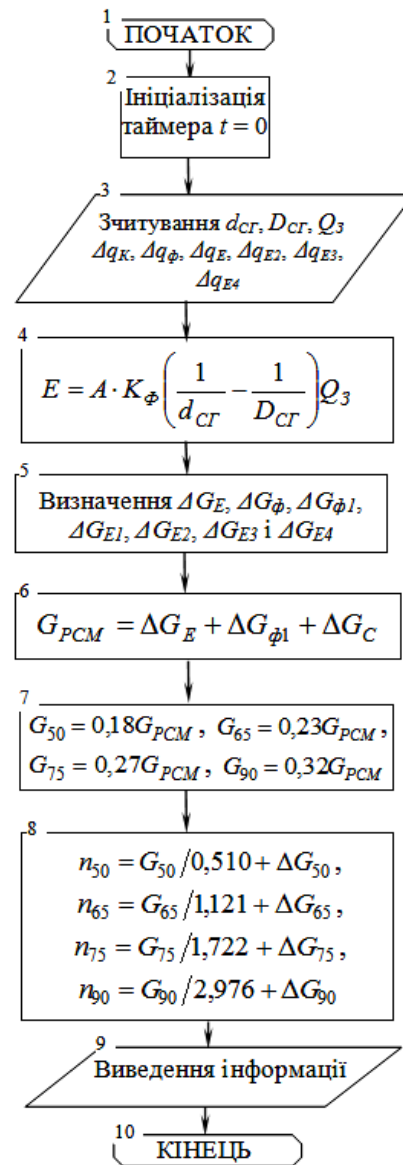


Рис. 1. Алгоритм визначення кількості різнорозмірних куль у циклі довантаження

Порційна подача різнорозмірних куль у технологічний агрегат потребує живильного пристрою, однак таких засобів в даний час не існує. Тому з використанням багатоструминного магазинного завантажувального пристрою, приведену на рис. 7.21 [10, с. 93] розроблено багатоструминний пристрій з магазинами для різнорозмірних куль.

На сучасних кулях 5<sup>-ї</sup> групи міцності він може жити кульовий млин МШЦ 4,5×6,0 впродовж доби, двох діб і навіть чотирьох діб, залишаючись порівняно не громіздким [11].

Отже, багатострумний пристрій з магазинами для завантаження різнорозмірних куль і інформаційно-керуючий блок створюють систему стабілізації кульового завантаження в млині в процесі експлуатації.

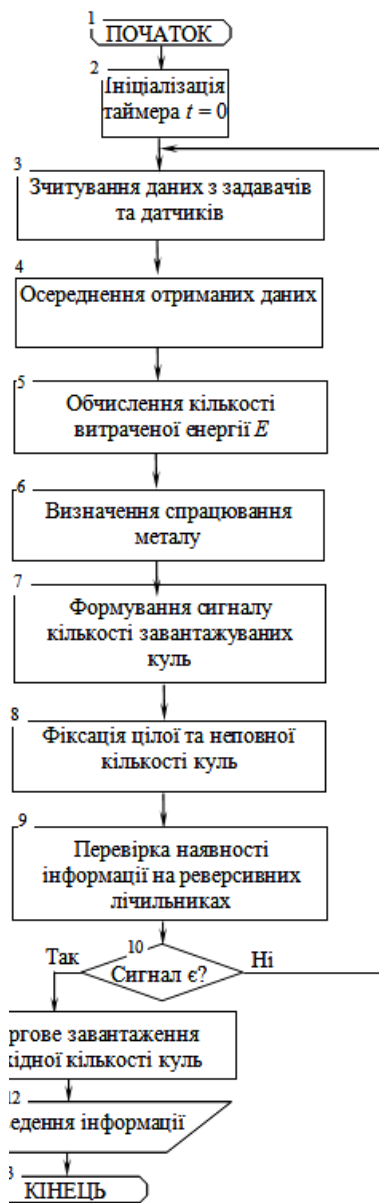


Рис. 2. Алгоритмічна схема виконання операцій завантаження куль у млин

**Висновки.** Таким чином, запропоновано спосіб автоматичного визначення кульового завантаження барабаних млинів, який базується на математичній моделі оцінювання витраченої на подрібнення встановленого обсягу руди корисної енергії за середніми гармонічними зваженими крупностями матеріалу в розвантаженні млина і вихідному живленні рудою, який за точністю значно перевищує відомі рішення.

Розроблено підхід визначення питомих витрат куль і футерівки на 1 кВт·г корисно затраченої енергії при подрібненні даного технологічного різнотипу руди впродовж встановленого часу роботи конкретного технологічного агрегату за результатами вагового оцінювання спрацювання куль і футерівки, розрахункового оцінювання корисно витраченої енергії та знаходження відношення спрацювань до корисно витраченої енергії, які є константами що слугують основою при керуванні кульовим завантаженням.

Вперше створено математичну модель знаходження кількості різнорозмірних куль у циклі завантаження після подрібнення встановленої маси руди, яка враховує корисно витрачену енергію, знайдену розрахунково, та питомі витрати металу на 1 кВт·г корисно витраченої енергії, які є константами в даному технологічному процесі.

Вперше розроблено алгоритм визначення кількості різнорозмірних куль у циклі довантаження і алгоритмічну схему виконання операцій завантаження молотного середовища у технологічний агрегат на заміну спрацьованого металу, які є базою створення системи стабілізації оптимального різнорозмірного кульового завантаження млина першої стадії рудопідготовки.

Математичні моделі і алгоритми враховують аналітичні вирази, отримані без будь-яких допущень, експериментальні дослідження можливо здійснити з забезпеченням високої точності оцінювання величин, а система керування є дискретною, тому запропонований підхід стабілізації оптимального різнорозмірного кульового завантаження барабанного млина забезпечує високу точність.

Перспективою подальших досліджень є розробка апаратури, яка реалізує запропоновані математичні моделі та алгоритми.

**Список літератури:**

1. Daniel M. J. Measurement of electrical energy consumption in a Bond ball mill. *Proc. Of the XXIII Intern. Mineral Processing Congress*. 2006. Pp. 92–97.
2. Улитенко К. Я. Оптимизация шаровой загрузки барабанных мельниц по потребляемой мощности. *Обогащение руд*. 2008. № 5. С. 42–44.

3. Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring / Pedrayes F. and other. *Powder Technology*. 2018. Vol. 323. P. 433–444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.10.026.
4. Серго Е.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Киев, 1975. 240 с.
5. Андреев С.Е., Зверевич В.В., Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва : Нед ра, 1980. 415 с.
6. Мацуї А.М., Кондратець В.О., Абашина А.А. Віртуальне оцінювання стану оптимального кульового завантаження млина, що подрібнює руду збагачувальних фабрик. *Розвиток промисловості та суспільства*: матеріали Міжн. наук.-техн. конф. (Кривий Ріг, 17–20 лист., 2020 р.). Кривий Ріг, 2020. С. 252.
7. Спосіб автоматичного визначення кульового завантаження барабанних млинів: пат. 122994 Україна: МПК В02С 17/18, В02С 25/00, F23К 1/02, G01L 3/26. №а201909799; заявл. 13.09.19; опубл. 28.01.21, Бюл. № 4. 7 с.
8. Мацуї А. М., Кондратець В. О., Абашина А. А. Математичне моделювання зв'язку середньогармонічної зваженої крупності та середньозваженої крупності в технологічних процесах рудопідготовки. *Проблеми математичного моделювання* : матеріали Всеукр. наук.-метод. конф. (Кам'янське, 25–28 трав. 2020 р.). Кам'янське, 2020. С. 6870.
9. Мацуї А.М., Кондратець В.О. Моделювання середньозваженої крупності твердого в завантаженні кульового млина рудою і пісками класифікатора. *Математичне моделювання*. 2017. № 1 (36). С. 59–66.
10. Кондратець В. О. Системи керування технологічними та виробничими процесами і проектуванням. Ч. II. Київ : Вища школа, 1993. 256 с.
11. Matsui A.N., Kondratets V.A., Abashina A.A. Loading device for ball mills with different sized grinding bodies. *Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing* : Proceeding 2<sup>nd</sup> Intern. scien. and techn. intern. conf. (Petrosani, Romania, 18 Nov. 2019). Petrosani, 2019. P. 150–152.

**Kondratets V.O., Meleshko Ye.V., Matsui A.M., Abashina A.A. STABILIZATION OF THE OPTIMUM DIFFERENT-SIZED BALL LOADING OF A DRUM MILL BY THE IMPLEMENTATION OF ALGORITHMS FOR ASSESSING ITS CONDITION**

*As a result of the low efficiency of ball mills, especially in the first stages of ore preparation at concentrators, the productivity of grinding raw materials is relatively low. The way out of this situation can be found in the improvement of the control object – a ball mill in terms of its grinding environment and in the transfer of the system to the modern information level. The research was conducted within the framework of the theme "Optimization of ball mill productivity of ore and finished product with minimum energy and material overruns", which is included in the scientific topics of the Central Ukrainian National Technical University. Therefore, the topic of the article is relevant. The purpose of this work is to increase the productivity of the ball mill of the first stage of ore dressing at concentrators. In carrying out research used the method of comparison, analysis, methods of ball mill theory, automatic control theory, computer science, programming, compiling algorithms. A method of automatic determination of ball loading of drum mills and a mathematical model of ball wear estimation by energy consumption for grinding a given volume of ore, which has a high enough accuracy, are proposed. A mathematical model in the form of 15 algebraic dependences for determining the number of balls of different sizes in the cycle of loading them into the mill is developed. An algorithm for determining the number of balls of different sizes in the loading cycle and an algorithmic scheme of loading operations of balls into the mill is developed. The proposed two mathematical models and two algorithms make it possible to create a stabilization system for the optimal multi-size ball loading of a new type. The system of stabilization of optimal ball loading in the mill, which can be created on the basis of the performed research in operation, allows to realize the advantages of the developed progressive grinding media. The practical significance of the conducted research lies in the significant up to 95,44% increase in productivity of grinding raw materials and savings in energy and material resources.*

**Key words:** mill, optimal different-sized ball loading, stabilization, algorithms, extra load.