



# УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СХЕМАМИ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Бойбутаев С.Б. [0000-0001-7231-965X]

Доцент кафедры “Автоматизация и управление” Навоийского  
государственного горно-технологического университета, PhD.

**Аннотация.** Предложена усовершенствованная система управления измельчением в шаровой мельнице с целью энергосбережения и снижения загрязнения окружающей среды. Разработана двухслойная архитектура оптимизации, включающая слой оптимизации размера частиц и слой оптимизации энергопотребления, где сначала рассчитывается оптимальное заданное значение размера частиц, а затем выполняется шаг оптимизации энергопотребления. Также предложен метод управления, адаптированный к износу футеровки в шаровых мельницах. Имитационные исследования показывают, что скорость подачи свежей руды была увеличена, а энергоэффективность повысилась.

**Ключевые слова:** оптимизация, энергоэффективность, экспертная система, схема измельчения.

**Annotatsiya.** Maqlada energiya tejamkorligi va atrof-muhit ifloslanishini kamaytirish maqsadida sharli tegimonda maydalashni boshqarishning takomillashtirilgan tizimi taklif etildi. Shuningdek ikki bosqichli optimallashtirish arxitekturasi ishlab chiqildi. Bu arxitektura zarrachalar o'lchamini optimallashtirish va energiya sarfini optimallashtirish qatlamlarini o'z ichiga oladi. Bunda avval zarrachalar o'lchamining optimal qiymati hisoblanadi, so'ngra energiya sarfini optimallashtirish bosqichi amalga oshiriladi. Shuningdek, sharli tegimondarda futerovkaning yeyilishiga moslashtirilgan boshqaruv usuli ham taklif etildi. O'tkazilgan imitatsion tadqiqotlar yangi rudani uzatish tezligi oshganini va energiya samaradorligi yaxshilanganini ko'rsatdi.

**Kalit so'zlar:** optimallashtirish, energiya samaradorligi, ekspert tizimi, yanchish sxemasi.

**Annotation.** An improved control strategy is proposed to control ball mill grinding circuits for energy saving and pollution reduction. A two-layer optimization architecture combined by particle size optimization layer and energy optimization layer is developed, where the optimal particle size set-point is calculated first, followed by the energy optimization step. A control method adaptive to the wear of liner in ball mills is also proposed. Simulation studies demonstrate that the fresh ore feed rate has been increased and the energy efficiency has been increased.

**Keywords:** optimization, energy efficiency, expert system, grinding circuit.

## Введение

Целью измельчения является уменьшение размера частиц руды до размера, называемого размером освобождения, чтобы ценный минеральный компонент был обнажен и мог быть извлечен в ходе последующей операции. Контуры измельчения обычно составляют около 50% от общих расходов обогатительной фабрики, при этом только 10% потребляемой электроэнергии идет на измельчение руды. Измельчение до размера, значительно меньшего, чем размер извлечения, также может иметь некоторые недостатки. Кроме того, что на измельчение расходуется больше электроэнергии, слишком мелкие частицы или шламы трудно извлечь, что также приведет к увеличению объема хвостовых выбросов и усложнит борьбу с загрязнением. Общая цель схемы измельчения заключается в максимизации скорости подачи свежей руды для достижения высокой энергоэффективности [1].

В основном в промышленности применяются такие схемы управления, как ПИД-регулирование, управление с модель прогнозирующего контроллера (МПК), экспертное управление и т.д. Хотя эти технологии достигли определенных



успехов в процессах измельчения, все еще остается возможность улучшить стратегии управления для повышения энергоэффективности и контроля загрязнения окружающей среды. Во-первых, большинство схем управления поддерживают размер частиц неизменным, независимо от того, изменились ли свойства руды или нет. На самом деле, например, для руды с меньшим содержанием серы, руда может быть измельчена до более крупного размера. При наличии более крупной фракции скорость подачи свежей руды может быть увеличена, а энергия сэкономлена. Во-вторых, мельница нуждается в замене футеровки каждые полгода-год. В первые дни после замены футеровки эффективный объем измельчения относительно меньше, поэтому скорость подачи необходимо тщательно контролировать, чтобы избежать перегрузки. На более поздней стадии скорость подачи можно увеличить, так как эффективный объем помола увеличился из-за износа футеровки [2].

В данной статье представлена усовершенствованная стратегия управления схемами измельчения в шаровой мельнице. Представлена двухслойная архитектура оптимизации, включающая оптимизацию размера частиц и оптимизацию энергопотребления. Рассматриваются различные условия работы для максимизации скорости подачи свежей руды и снижения выброса отходов. Статья организована следующим образом: в начале приводится краткое описание схемы измельчения на шаровой мельнице. Затем формулируется улучшенная стратегия управления в сочетании с двухслойной архитектурой оптимизации. Построено и проанализировано имитационное исследование, в заключение даны выводы [3].

### Описание процесса измельчения в шаровой мельнице

Типовые схемы измельчения работают по замкнутому циклу, как показано на рис. 1, который состоит из шаровой мельницы, насосного ЗУМПФа, гидроциклонов и связанных с ними насосов и конвейеров для подачи твердых частиц [4,5]

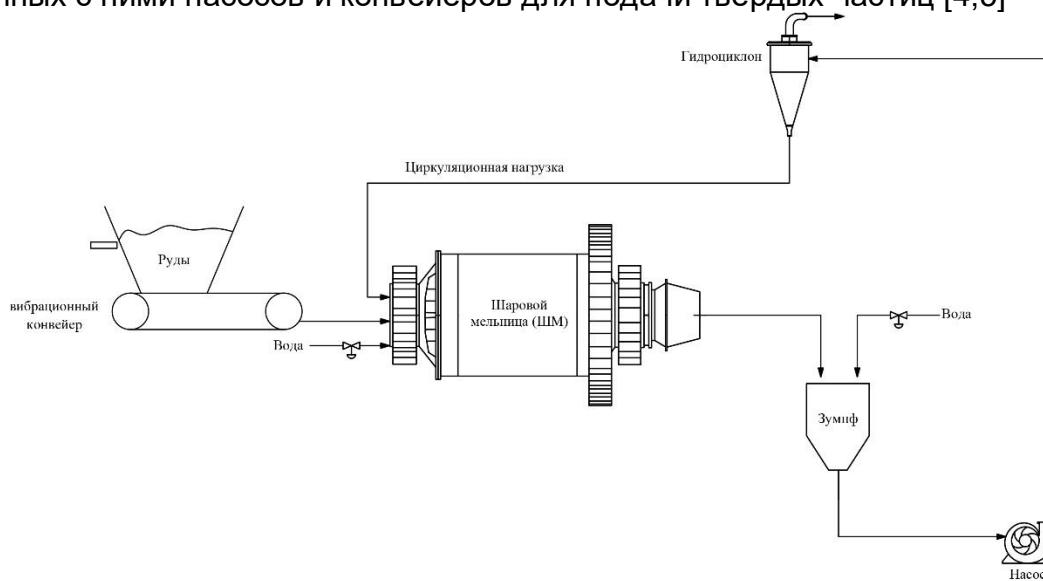


Рис. 1. Технологическая схема процесса измельчения.

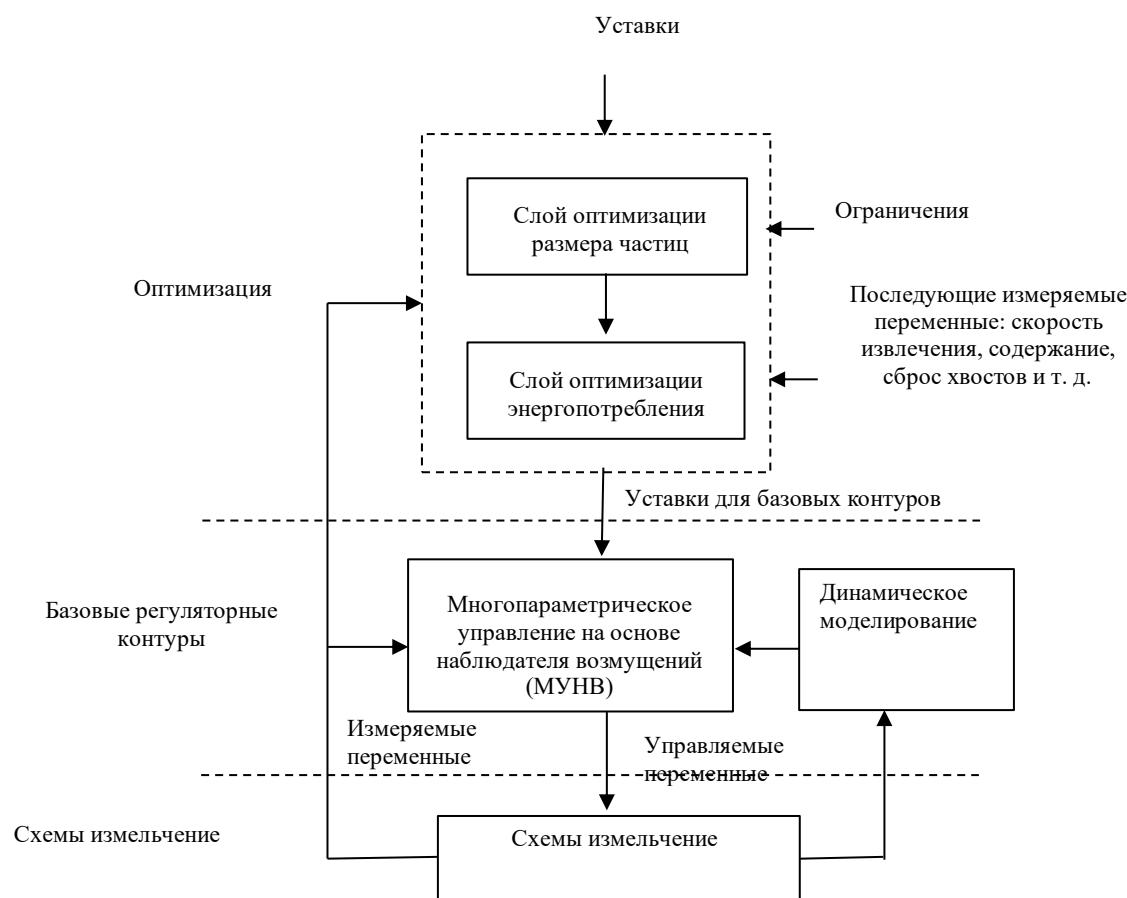
Шаровая мельница состоит из цилиндрического корпуса, врачающегося вокруг своей оси с помощью двигателя. В цилиндр загружаются тяжелые металлические шары, называемые мелющими средами. Крупная руда (обычно из первичной дробилки) подается в мельницу вместе с водой при мокром измельчении. Под



действием шаров, вращающихся в мельнице, руда измельчается до более мелких фракций. Суспензия, содержащая мелкий продукт, выводится из мельницы в ЗУМПФа, а затем подается в гидроциклоны для классификации. Суспензия разделяется на два потока: переливной поток, содержащий более мелкие частицы, и нижний поток, содержащий более крупные частицы в качестве циркулирующей загрузки. Перелив представляет собой желаемый продукт. Циркулирующая загрузка возвращается в шаровую мельницу для дальнейшего измельчения [6,7].

### Улучшенная система управления

Принципиальная схема усовершенствованной системы управления для шаровых мельниц показана на рис 2.



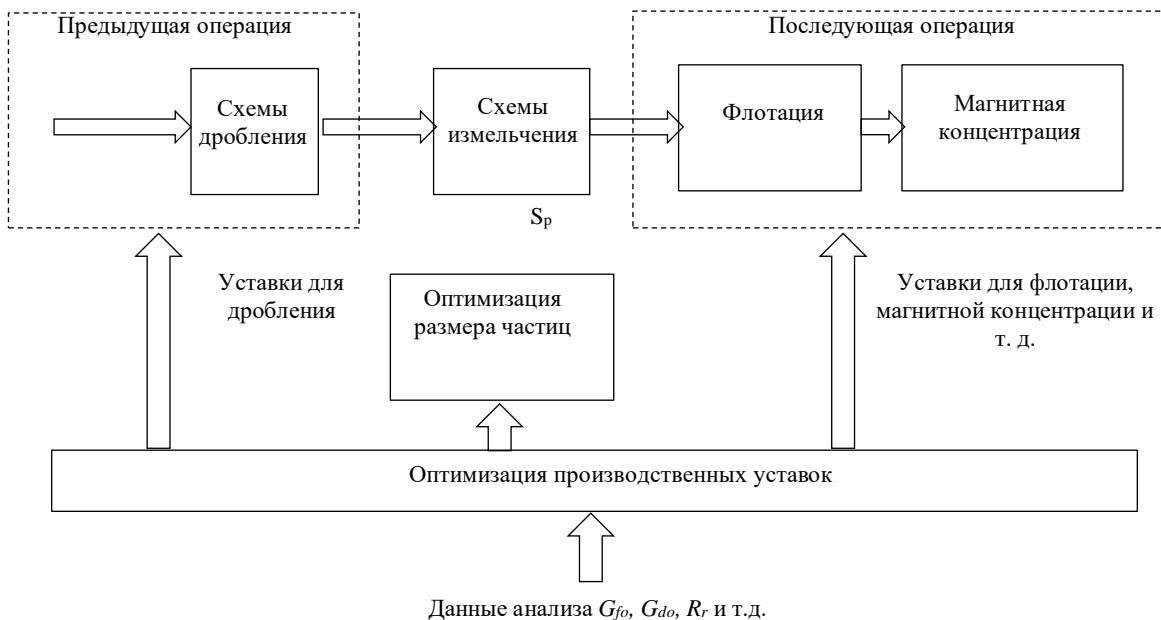
**Рис. 2. Принципиальная схема усовершенствованной стратегии управления схемы измельчения.**

В верхней части архитектуры на рис.2 находится слой оптимизации, в котором есть два подуровня: слой оптимизации размера частиц и слой оптимизации энергии.

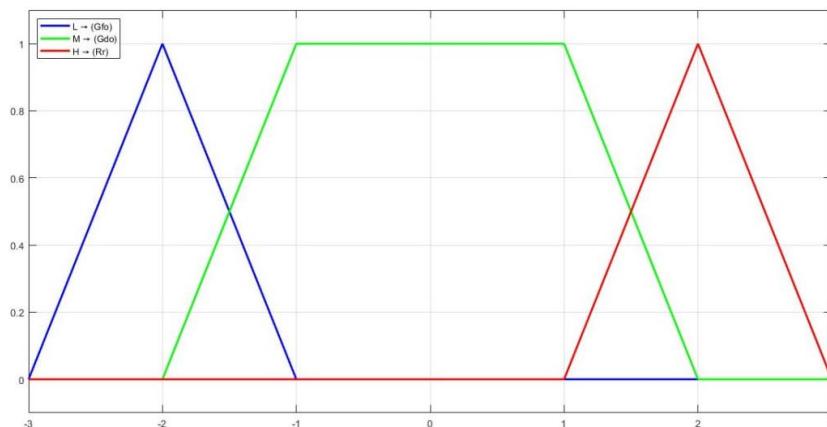
Слой оптимизации размера частиц предназначен для поиска оптимального заданного размера частиц, поскольку в реальной практике свойства руды время от времени меняются. Слишком мелкий размер частиц в схеме измельчения не только потребляет слишком много энергии, но и вызывает больший выброс хвостов, что приводит к снижению коэффициента извлечения металла ( $R_g$ ) [8,9].



С целью экономии энергии и снижения загрязнения окружающей среды необходимо регулировать заданные значения крупности в зависимости от изменения свойств руды. На самом деле, опытные операторы могут регулировать заданные параметры крупности и другие параметры в соответствии с данными лабораторных анализов содержания мелкой руды ( $G_{fo}$ ), содержания разгруженной руды ( $G_{do}$ ) и  $R_r$  и т.д., как показано на рис.3.



**Рис.3. Слой оптимизации размера частиц для схем измельчения.**



**Рис. 4. Технологическая схема процесса измельчения**

Предыдущий процесс в основном относится к работе дробилки, а последующие операции обычно включают флотационный процесс, магнитный процесс и т.д. Оптимальное значение размера частиц для схемы измельчения основывается на  $G_{fo}$ ,  $G_{do}$  и  $R_r$  и т.д. в соответствии с библиотечным анализом. Переменные предст, как показано на рис.4, где Н, М и Л означают высокий, средний и низкий уровень соответственно [10,11].

Экспертная система здесь может быть построена в соответствии с нашей ранней работой [6]. База знаний создается с помощью производственных правил, основной схемой которых является « IF условия THEN результаты », где условие - это характерное состояние процесса или логическая последовательность



характерных состояний, а результат - это определенная функция. К основным правилам относятся:

$$\begin{aligned} R_1: & \text{IF } G_{fo}=H \text{ AND } G_{do}=H \text{ AND } R_r=L \text{ THEN DEC } S_p^* \\ R_2: & \text{IF } G_{fo}=H \text{ AND } G_{do}=M \text{ AND } R_r=L \text{ THEN DEC } S_p^* \\ R_3: & \text{IF } G_{fo}=L \text{ AND } G_{do}=H \text{ AND } R_r=L \text{ THEN INC } S_p^* \\ R_4: & \text{IF } G_{fo}=L \text{ AND } G_{do}=M \text{ AND } R_r=L \text{ THEN INC } S_p^* \end{aligned}$$

где  $S_p^*$  - заданное значение размера частиц, а INC и DEC - увеличение и уменьшение соответственно.

Другие правила для регулирования  $S_p^*$  также могут быть интегрированы в интеллектуальную систему в соответствии со спецификой процесса.

Уровень оптимизации энергопотребления является вторым подслоем, и подробное описание этого слоя можно найти в статье. Здесь мы представляем разработанную нами модель управления, адаптированную к износу футеровки в мельнице, чтобы максимизировать энергоэффективность [12,13].

Обычно футеровку в шаровой мельнице необходимо заменять каждые полгода-год. Сразу после замены футеровки эффективный объем помола довольно мал. На этом этапе желательно снизить скорость подачи свежей руды, чтобы избежать перегрузки. На более позднем этапе, наоборот, можно увеличить скорость подачи свежей руды, так как футеровка сильно изнашивается и эффективный объем измельчения увеличился. Для простоты здесь выделены три режима работы в соответствии с различными стадиями [14,15].

$$Mode = \begin{cases} Mode & I & t \leq t_{sp1} \\ Mode & II & t_{sp1} \leq t \leq t_{sp2} \\ Mode & III & t_{sp2} \leq t \end{cases}$$

где  $t_{spi}$  ( $i=1,2$ ) - разное время разделения мельницы на 3 рабочих этапа. Система управления представлена следующим образом

$$\begin{cases} Mode & I & F_{f1} = \psi_1(F_{f0}) \\ Mode & II & F_{f2} = F_{f0} \\ Mode & III & F_{f3} = \psi_2(F_{f0}) \end{cases}$$

где  $F_{fi}$  ( $i=1,2,3$ ) - идеальное значение сброса (IRV) скорости подачи исходной руды для ранней, средней и поздней стадии после замены футеровки мельницы;  $F_{f0}$  - номинальная скорость подачи исходной руды, а  $F_{f1}, F_{f2}$  - линейные функции  $F_{f0}$ .

Следует отметить, что этапы работы могут быть более разделены, что, конечно, будет более адаптировано к реальной промышленной практике.

## Имитационное моделирование

ПИД - или МПК-системы управления демонстрируют ограниченные возможности в управлении измельчительными цепями шаровых мельниц в присутствии сильных возмущений, поэтому мы интегрируем многопараметрическое управление на основе наблюдателя возмущений (МУНВ), предложенное нами ранее.

Рассмотрим следующую модель процесса

$$\begin{bmatrix} S_p(s) \\ F_c(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_f(s) \\ F_d(s) \end{bmatrix}$$

где  $S_p$ ,  $F_c$ ,  $F_f$ ,  $F_d$  - размер частиц, циркулирующая нагрузка, скорость подачи исходной руды и скорость потока воды для разбавления, соответственно, и



$$G_{11}(s) = g_{11}(s)e^{-\tau_{11n}s} = \frac{-0.58}{2.5s+1}e^{-0.68s}$$

$$G_{12}(s) = g_{12}(s)e^{-\tau_{12n}s} = \frac{4(1-0.9938e^{-0.47s})}{(2s+1)(6s+1)}e^{-0.2s}$$

$$G_{21}(s) = g_{21}(s)e^{-\tau_{21n}s} = \frac{2.2}{6s+1}e^{-0.6s}$$

$$G_{22}(s) = g_{22}(s)e^{-\tau_{22n}s} = \frac{2.83}{3.5s+1}e^{-0.13s}$$

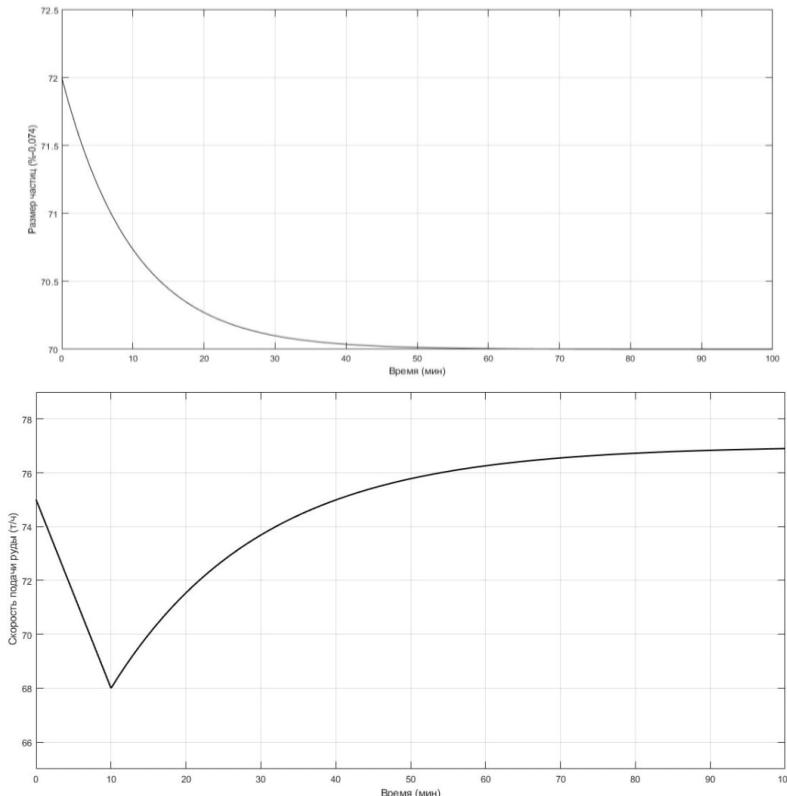
Установить целевую функцию

$$\min \Phi_k = \sum_{j=k+1}^{k+p} [Y(j|k) - Y^*]Q[Y(j|k) - Y^*] + \sum_{j=k}^{k+M-1} \{U(j|k) - U^*\}R[U(j|k) + \Delta U^T(j|k)S\Delta U(j|k)]$$

$$U_{\min} \leq U(j|k) \leq U_{\max}, j = k, \dots, k+M-1$$

$$\Delta U_{\min} \leq \Delta U(j|k) \leq \Delta U_{\max}, j = k, \dots, k+M-1$$

где  $Y = [y_1, y_2]$  - управляемые переменные  $S_p$ ,  $F_c$ , и  $Y^* = [y_1^*, y_2^*]$  - заданные значения  $S_p$  и  $F_c$ ,  $U = [u_1, u_2]$  - управляющие переменные, и  $U^* = [u_1^*, u_2^*]$  - ИРВ  $F_f$  и  $F_d$ .  $Q$  - вектор весовых коэффициентов ошибок, а  $R$  - вектор весовых коэффициентов входов.



**Рис. 5. Влияние размера частиц (1) и скорости подачи руды (2) после внедрения системы управления.**

Предположим, что в настоящее время шаровая мельница работает в режиме II, и  $u_1^* = F_{f0} * 1$  и  $u=$ составляет 75 т/ч,  $y_1^* = S_p^*$  изменяется с 72% (0.074 мм) до 70% (0.074 мм) после введения в действие предложенной оптимизации. На рис.5 показаны кривые размера частиц и скорости подачи свежей руды соответственно. Как видно из рис.5, скорость подачи свежей руды увеличилась с первоначальных 75 т/ч до более чем 77 т/ч. Когда режим работы изменился с режима II на режим III, скорость подачи свежей руды также увеличилась, как и на рис.5, который здесь



опущен для удобства. Очевидно, что скорость подачи свежей руды была улучшена, а затем повысилась энергоэффективность.

## Заключения

Усовершенствованная система управления предложена для управления схемами измельчения в шаровых мельницах с целью экономии энергии и снижения загрязнения окружающей среды. Предложена двухслойная архитектура оптимизации, включающая слой оптимизации размера частиц и слой оптимизации энергии, в которой сначала рассчитывается оптимальный размер частиц, а затем выполняется оптимизация энергии. Также предложен метод управления, адаптированный к износу футеровки в шаровых мельницах. Имитационные исследования показывают, что тоннаж увеличился, а значит, увеличилась и энергоэффективность. Однако, по сравнению с другими стратегиями управления и оптимизации, предложенный метод может потребовать длительного сбора и обработки данных опытными экспертами или операторами.

## Список использованной литературы:

- [1]. П.В. Кузнецов, В.Н. Богатиков, А.Е. Пророков, "Алгоритм создания информационной нейро-модели для целей оптимизации управления технологическими процессами измельчения и классификации" Кольского научного центра РАН. - 2010. - № 3. - С. 112-115.
- [2]. Kalandarov I., Namozov N., Bozorov B. Analyses and algorithms of personnel safety in mines using event tree and Bayesian network method //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2024. – Т. 531. – С. 03018.
- [3]. Кадыров Ю.Б.; Бойбутаев С.Б.; и Самадов А.Р. (2020) «Математическое моделирование шаровой мельницы гмз-2 нгмк на основе диффузионной модели», Химическая технология, контроль и управление : Том. 2020 : Вып. 5 , Статья 9.
- [4]. Mukhitdinov, Djalolitdin Pakhritdinovich and Boybutayev, Sanjar (2021) "Problems Of Modeling And Control Of The Technological Process Of Ore Grinding," Chemical Technology, Control and Management: Vol. 2021 : Iss. 4 , Article 7.
- [5]. Мамлиева Ф.Р., Бойбутаев С.Б., Мухитдинов Д.П. Математическое моделирование динамики процесса дробления // инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сборник научных трудов 6-ой Международной научно-практической конференции (2-3 июня 2016 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.); Юго-Зап. гос. ун-т., ЗАО «Университетская книга», Курск. – 2016. – С. 187-189.
- [6]. Пулатов В.Б., Кадиров Ё.Б., Бойбутаев С.Б., Ийдиева Р.Р. Математическое моделирование работы шаровой мельницы в ГМЗ-2 НГМК // Научно - технический и производственный журнал «Горный вестник Узбекистана» №4/2020 – С 56-59.
- [7]. Бойбутаев С.Б., Кадиров Е.Б., Саттаров О.У.У. Разработка экспертной системы управления процессом измельчения и классификации на основе нейронных сетей // современные материалы, техника и технологии ISSN: 2411-9792 – 2017. – С. 9-16.
- [8]. С.Н. Ткач, “Настройка параметров адаптивного контроллера с использованием нечеткой нейронной сети” Программные продукты и системы, 2001, №3, с.9-16



- [9]. Kalandarov I., Namozov N. N. LoRa signallari yordamida yer osti kon ishlarida xodimlar harakatlanish traektoriyasini aniqlash modeli //Digital Transformation And Artificial Intelligence. – 2023. – T. 1. – №. 4. – C. 146-148.
- [10]. Vakhromeev A. G. et al. Geoecological monitoring of the “Mustaqillikning 25 yilligi” gas field //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – T. 417. – C. 04007.
- [11]. Kalandarov I., Namozov N., Bozorov B. Yer osti kon ishlarida xodimlar xavfsizligini ta'minlash tizimlari tahlili //Innovatsion texnologiyalar. – 2023. – T. 52. – №. 04.
- [12]. Kabulov A. et al. Control System and Algorithm for Construction of Optimal Technological Routes for Machining Parts in the Machining Shop //International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry “Interagromash””. – Cham : Springer International Publishing, 2022. – C. 2566-2574.
- [13]. Simulink – моделирование и симуляция динамических систем для Simulink [Электронный ресурс] / MatLab и Simulink центр компетенций компании Mathworks. M., 2019. Режим доступа: <https://MatLab.ru/products/simulink>. Дата доступа: 10.07.2019.
- [14]. Каландаров И. И. и др. Преобразователь передачи информации в информационную систему контроля горюче-смазочных материалов //Journal of Advances in Engineering Technology. – 2022. – №. 3. – С. 5-8.
- [15]. Namozov N. N. Tog ‘-kon sanoatida piyodalar va transport vositalari o‘rtasida to‘qnashuvlarini oldini olish usullari va sun’iy intellekt texnologiyasining o‘rnı //Indexing. – 2024. – T. 1. – №.1.