DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-122-132

Богданов В.С., Сухоруков И.Н., Богданов Д.В., Несмеянов Н.П.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
**E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com*

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Аннотация. *Шаровые барабанные мельницы нашли широкое применение во многих отраслях промышленности, в которых требуется высокая часовая производительность одного агрегата, достигающая нескольких сот тонн готового продукта – это горнорудная промышленность, энергетическая, химическая и промышленность строительных материалов. К настоящему времени габаритные размеры мельниц достигли своих пределов самая большая в мире мельница имеет диаметр 12 метров и длину барабана 36 метров, а ее производительность составляет 3000 тонн в час. Одним из основных направлений совершенствования мельниц является разработка таких конструкций внутримельничных устройств, которые повышали бы эффективность процесса измельчения в целом. Приведен краткий анализ конструкций шаровых барабанных мельниц, эффективность процесса измельчения. Описана конструкция предлагаемой авторами футеровки, состоящей из стандартных плит, в которых сделаны поперечные желоба диаметр желобов соответствует диаметру мелющих тел, находящихся на данном участке барабана мельницы. Диаметр желобов от загрузки к выгрузке уменьшается. Показано взаимодействие футеровки с мелющими телами и ее способность предотвращать поперечную и продольную сегрегацию мелющих тел. В ходе поисковых экспериментов выявлены основные факторы, влияющие на классификацию мелющих тел. К таким факторам относятся: коэффициент загрузки барабана мельницы мелющими телами; частота вращения барабана мельницы; глубина пазов футеровки; количество выступов в пазах футеровки. В качестве параметров оптимизации были выбраны: производительность мельницы; потребляемая мощность привода; удельный расход энергии; остаток на сите 008; удельная поверхность готового продукта. Приведены результаты экспериментальных исследований в виде уравнений регрессии и графиков. Проведен всесторонний анализ влияния исследуемых факторов и эффектов взаимодействия на формирование величин функций отклика и эффективность процесса измельчения в целом. Для выявления рациональных конструктивно-технологических параметров шаровой барабанной мельницы и режимов ее работы были совместно рассмотрены зависимости производительности мельницы и удельного расхода энергии от основных ее факторов. Установлены рациональные режимы работы шаровой барабанной мельницы, оснащенной новой конструкцией футеровки.*

Ключевые слова*: шаровая мельница, мелющие тела, сегрегация, измельчаемый материал.*

Введение. Шаровые барабанные мельницы (ШБМ) нашли широкое применение во многих отраслях промышленности – в горнорудной при помоле руд черных и цветных металлов, в энергетической при помоле угля, в химической при помоле различных минералов, в производстве цемента при помоле сырья, клинкера и добавок. Существенным преимуществом ШБМ является простота конструкции, высокая часовая производительность, достигающая тысяч тонн в час готового продукта и возможность осуществлять процесс измельчения при различных способах помола – по сухому, по мокрому и с одновременной сушкой [1–5]. Они могут работать в открытом, замкнутом, многоступенчатом циклах измельчения, что позволяет учитывать физико-механические свойства измельчаемого материала и обеспечивать требования к качеству готового продукта. В мировой практике доля ШБМ наряду с другими помольными агрегатами превышает 80 %. Однако они обладают и существенными недостатками главным, из которых является весьма низкий КПД (коэффициент полезного действия), который не превышает 5 % [6–10]. Несмотря на эти недостатки, по мнению отечественных и зарубежных экспертов, в обозримом будущем ШБМ останутся основным помольным агрегатом при крупнотоннажном производстве. В связи с этим проблема совершенствования конструкций ШБМ, с целью повышения эффективности их работы является актуальной [11–14].

Материалы и методы. Все известные конструкции ШБМ представляют собой полый цилиндрический барабан на 30–35 % заполнен мелющими телами чаще все шарами диаметром 40–110 мм. Также в качестве мелющих тел используются металлические пруты диаметром 80–100мм и длиной до 6 м, цильпебс – металлические цилиндры диаметром 28–40 мм и длиной до 45 мм. Кроме этого, в керамическом и производстве используется речная галька и шары из циркония.

Процесс измельчения осуществляется следующим образом. При вращении барабана мельницы мелющие тела под воздействием центробежной силы поднимаются на определенную высоту и падают, измельчая материал ударом, раздавливанием и истиранием. В ШБМ для измельчения должны подаваться куски материала размером до 50 мм. Однако на практике это не всегда выдерживается и в мельницу зачастую попадают куски размером до 300 мм. Безусловно это приводит к нарушению технологического регламента и снижению качества готового продукта. Для более эффективного процесса измельчения с учетом того, что в мельницу поступают куски материала различной крупности в барабан мельницы одновременно загружают набор мелющих тел размером от 40 до 110 мм. Целесообразно чтобы в процессе работы наиболее крупные мелющие тела находились в начале барабана мельницы и во внешнем слое загрузки куда поступают исходные крупные куски материала. Однако на практике происходит сегрегация мелющих тел. Крупные мелющие тела перемещаются в центральную часть загрузки и к выходу из помольной камеры, т. е. происходит то, что крупные куски в начале барабана мельницы измельчаются мелкими шарами, а в конце помольной камеры мелкие частицы измельчаются крупными шарами. Это существенно снижает эффективность процесса измельчения в целом – загрубляется готовый продукт, снижается производительность мельницы и как следствие повышается удельный расход энергии. С целью предотвращения сегрегации мелющих тел внутренняя поверхность барабана мельницы футеруется плитами различной конструкции, которые призваны существенно снизить сегрегацию мелющих тел.

Нами разработана принципиально новая конструкция футеровки, которая обеспечивает как поперечную, так и продольную классификацию мелющих тел предотвращает их сегрегацию [15–17].

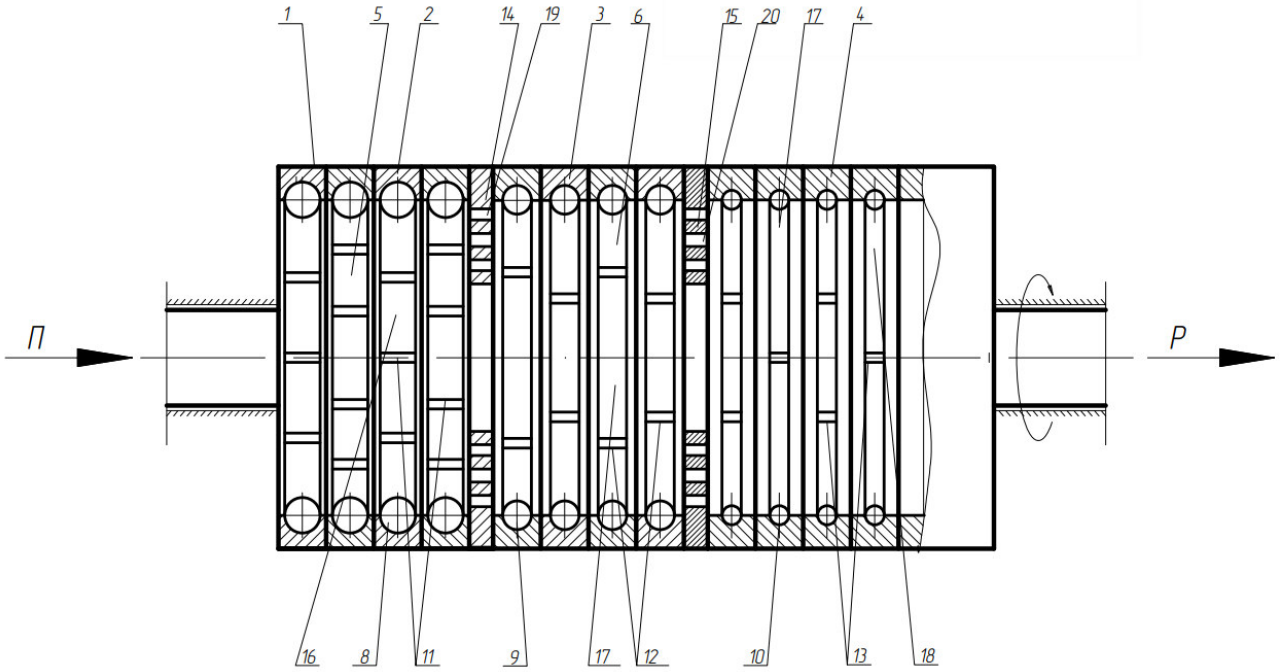


Рис. 1. Продольное сечение барабана мельницы с предлагаемой конструкцией футеровки
1– корпус мельницы (барабан); 2, 3, 4 – бронеплиты; 5, 6, 7 – желоба; 8, 9, 10 – мелющие тела; 11, 12, 13 – выступы в желобах; 14, 15 – перфорированные поперечные кольца; 16, 17, 18 – секции; 19, 20 – сквозные щели в поперечных кольцах.

На рис.1 представлено продольное сечение барабана ШБМ, в котором установлена разработанная нами футеровка. Особенность предлагаемой конструкции ШБМ заключается в том, что внутренняя поверхность цилиндрического корпуса 1 футеруется бронеплитами 2, 3, 4, на поверхности которых выполнены соответствующие желоба 5, 6, 7 глубиной равной 0,4–0,5 диаметра шара. В желобах 5, 6, 7 выполнены выступы, соответственно, 11, 12, 13, высота которых равна 0,6–0,7 диаметра шара, находящегося в соответствующей секции 16, 17, 18, образованных между перфорированными кольцами 14, 15. В каждом из желобов 5, 6, 7 помещаются мелющие тела (шары) 8, 9, 10 соответствующего диаметра. Расстояние Л, М, Н между перфорированными кольцами пропорционально массе мелющих тел, находящихся на данном участке барабана мельницы. Размер мелющих тел уменьшается от загрузки к выгрузке по ходу процесса измельчения.

ШБМ работает следующим образом. Измельчаемый материал, клинкер вращающихся печей, подается в направлении П через полую загрузочную цапфу в секцию 16 помольной камеры мельницы, в которой подпадают под воздействие самых крупных мелющих тел 8, находящихся в желобах 5 и перемещаемых в поперечном сечении барабана и измельчают частицы материала преимущественно ударом. По мере измельчения частицы материала проходят через отверстия 19 в перфорированном кольце 14 поступают в секцию 17 и подвергаются последующему измельчению мелющими телами 9 меньшего диаметра находящимися в желобах 6. Измельчение материала в этой секции происходит в комбинированном режиме – частично ударом и истиранием. Далее частицы измельчаемого материала перемещаются через отверстия 20 в перфорированном кольце 15, поступают в секцию 18 с мелющими телами 10 меньшего диаметра. Их измельчение осуществляется в режиме раздавливания и истирания. Готовый продукт разгружается через полую разгрузочную цапфу в направлении Р. В каждом из желобов 5, 6, 7 имеются выступы 11, 12, 13, посредством которых мелющие тела поднимаются на заданную высоту. В секции 16 высота подъема мелющих тел 8 максимальная, в секции 17 высота подъема мелющих тел 10 минимальная.

Такое конструктивное выполнение футеровки с желобами различного диаметра и выступами обеспечивает распределение мелющих тел по размерам вдоль продольной оси барабана мельницы и предотвращает как поперечную, так и продольную их сегрегацию, что существенно повышает эффективность процесса измельчения.

Определение рациональных конструктивных параметров и режимов процесса измельчения в ШБМ, оснащенной новой конструкцией футеровки осуществлялось в экспериментальной установке 0,32×1,5 м, работающей в периодическом и открытом цикле измельчения. В качестве мелющих тел использовались шары диаметром 12–20 мм, а измельчению подвергался клинкер размером 1–0,63 мм.

Экспериментальные исследования проводились по полнофакторному плану ЦКРП 2^4. В ходе поисковых экспериментов определены основные факторы, влияющие на эффективность процесса измельчения: коэффициент загрузки мелющими телами x_1 (ϕ) ; частота вращения барабана мельницы x_2 (п) ; глубина пазов футеровки x_3 (h) ; количество выступов в пазах футеровки x_4 (z) . В качестве параметров оптимизации были выбраны – производительность мельницы $У_1$(Q); потребляемая мощность привода $У_2$(Р) ; удельный расход энергии $У_3$(q) ; остаток на сите 008 $У_4$ (R) ; удельная поверхность $У_5$ (S) .

Коэффициент загрузки мелющими телами регулировался в пределах 0,05–0,40; частота вращения барабана мельницы регулировалась в пределах 0,08–0,95 $с^{-1}$; глубина пазов футеровки от 3 до 14мм; количество выступов футеровки 2–10 шт.

В ходе реализации и обработки результатов экспериментов нами были получены уравнения регрессии в кодированном виде:

Производительность:

$$У_1(Q)= 23,726 + 0,837X_1 + 0,229X_2 – 1,625X_3 + 0,521X_4 – 0,615X_1X_2 + 0,809X_1X_3 + 0,641X_1X_4 – – 0,503X_2X_3 – 0,444X_2X_4 – 0,781X_3X_4 – 0,269X_1^2 +0,256X_2^2 + 1,319X_3^2 + 0,606X_4^2 \quad (1)$$

Потребляемая мощность:

$$У_2(Р)= 1,563 + 0,297X_1 + 0,049X_2 + 0,021X_3 – 0,043X_4 – 0,013X_1X_2 + 0,082X_1X_3 – 0,010X_1X_4 + + 0,025X_2X_3 + 0,009X_2X_4 – 0,023X_3X_4 – 0,002X_1^2 – 0,018X_2^2 + 0,024X_3^2 + 0,08X_4^2 \quad (2)$$

Удельный расход энергии:

$$У_3(q) = 66,091 + 10,583X_1 + 1,495X_2 + 5,476X_3 - 3,553X_4 + 0,856X_1X_2 + 0,977X_1X_3 – – 1,717X_1X_4 + 2,735X_2X_3 + 1,459X_2X_4 + 1,693X_3X_4 + 0,323X_1^2 – 1,136X_2^2 – 3,516X_3^2 – 1,679X_4^2 \quad (3)$$

Остаток на сите 008:

$$У_4(R_{008}) = 3,405 – 0,363X_1 – 0,956X_2 + 2,430X_3 + 0,205X_4 + 1,419X_1^2 + 0,109X_2^2 ++ 1,567X_3^2 + + 1,143X_4^2 –0,054X_1X_2 + 1,603X_1X_3 + 0,303X_1X_4 - 0,621X_2X_3 - 0,381X_2X_3 + 0 ,324\ X_3X_4 \quad (4)$$

Удельная поверхность:

$$У_5(S) = 2483,11 - 10,37X_1 – 158,91X_2 – 336,58X_3 – 18,15X_4 – 115,36X_1^2 – 115,39X_2^2 + + 12,28X_3^2 – 11,42X_4^2 – 5,71X_1X_2 – 96,24X_1X_3 + 37,30X_1X_4 + 17,96X_2X_3 + 50,40X_2X_4 +115,93X_3X_4 \quad (5)$$

Анализ величины и знаков коэффициентов при факторах и эффектах взаимодействия в уравнениях регрессии (1)–(5) позволяет определить влияние каждого из них на формирование величины соответствующего параметра оптимизации.

Наибольшее влияние на увеличение производительности (1) мельницы оказывают коэффициент загрузки барабана мельницы мелющими телами, количество выступов на футеровке и частота вращения барабана мельницы. С их увеличением производительность мельницы возрастает. Это очевидно. А увеличение глубины пазов приводит к снижению производительности, так как шары начинают выпадать из пазов и это приводит к нарушению режима движения мелющих тел, их сегрегации и снижает эффективность процесса измельчения в целом. Сравнивая величину коэффициентов в уравнении (1), можно сделать вывод о том, что наряду с основными факторами существенное влияние на формирование функции отклика вносят эффекты взаимодействия X_1X_3, X_1X_4. Причем суммарная абсолютная величина коэффициентов при факторах X_1, X_2, X_3, X_4 составляет 0,038, а при эффектах взаимодействия этих факторов – 0,278, т.е. в 7,3 раза больше.

Аналогичные выводы можно сделать и в отношении уравнения (2). Величина потребляемой мощности зависит в большей мере от величины коэффициента загрузки мелющими телами, частоты вращения барабана мельницы и глубины пазов в футеровке. При этом эффекты взаимодействия факторов в меньшей степени влияют на формирование величины функции отклика. Суммарная величина коэффициентов при факторах равна 0,324, а при соответствующих эффектах взаимодействия 0,094, т.е. в 3,44 раза меньше.

Удельный расход энергии определяется как отношение потребляемой мощности привода к производительности мельницы и он определяется по уравнению регрессии (3). Этот параметр зависит от параметров (1) и (2) и он характеризует эффективность процесса измельчения. Рациональным является такой режим работы мельницы, при котором производительность мельницы по готовому продукту стремится к максимуму, а потребляемая мощность привода к минимуму. Хотя известно, что максимальная производительность мельницы пропорциональна потребляемой мощности привода. А именно, чем больше производительность мельницы, тем больше величина потребляемой мощности. Этот вывод является базовым и на практике необходимо стремится к снижению удельного расхода энергии, в большей мере, за счет повышения эффективности процесса измельчения, путем интенсификации движения мелющих тел, предотвращения их поперечной и продольной сегрегации, обеспечения внутримельничной классификации измельчаемого материала.

Качество готового продукта характеризуется размером частиц, который контролируется остатком на контрольном сите с размером ячеек 80мкм (4) и их удельной поверхностью (5). Величина коэффициентов (4), их знаки позволяют сделать вывод о том, что с увеличением коэффициента загрузки и частоты вращения барабана мельницы остаток на сите 008 снижается т.е. качество помола улучшается – этот вывод очевиден. А с увеличением глубины пазов и количества выступов в пазах помол загрубляется. Это можно объяснить тем, что большая часть мелющих тел работает в водопадном ударном режиме измельчения, что снижает эффективность процесса измельчения. Суммарная величина коэффициентов при факторах равна 1,316, а при эффектах взаимодействия 0,375, т.е. в 3,5 раза меньше. Эффекты взаимодействия в данном случае оказывают существенно меньшее влияние на формирование функции отклика, чем сами факторы.

Что касается уравнения (5) – удельной поверхности частиц готового продукта то величина удельной поверхности, в данном случае, зависит от размера частиц готового продукта, т.е. чем меньше размер частиц, тем больше удельная поверхность готового продукта. Отрицательные знаки при всех факторах в уравнении (5) говорят о том, что увеличение любого из факторов приводит к снижению удельной поверхности готового продукта, а за счет эффектов взаимодействия удельная поверхность возрастает. Разница между величиной коэффициентов в первой степени и эффектами взаимодействия составляет 0,11, т.е. 0,03 %, что не существенно. Таким образом, формирование величины функции отклика (5) в равной мере обеспечивается как факторами, так и их эффектами взаимодействия.

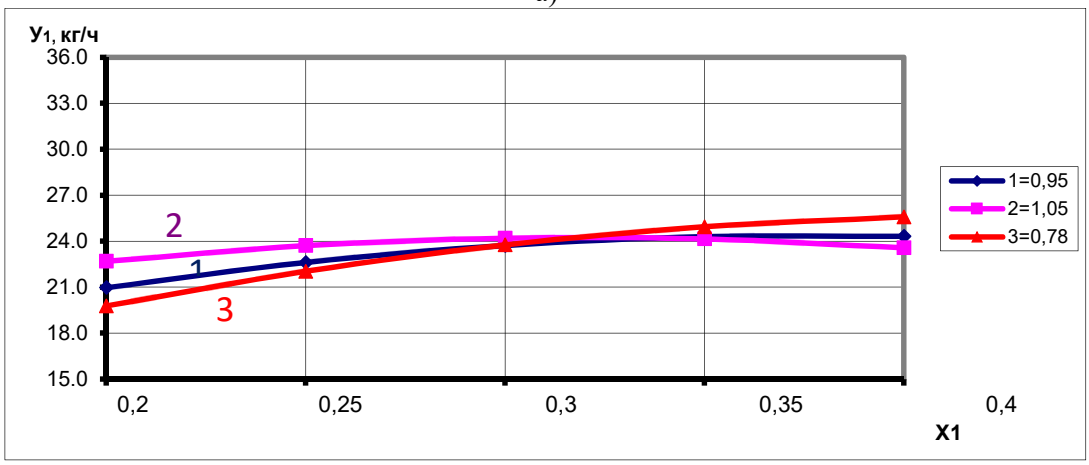
На рис. 2, рис. 3, рис.4 представлены графические зависимости, отражающие наиболее характерные результаты экспериментальных исследований.

Минимальная производительность мельницы 19 кг/ч (рис. 2, б) соответствует минимальному коэффициенту загрузки, равному 0,2, глубине пазов равным 11 мм, при этом увеличение коэффициента загрузки до 0,4 обеспечивает повышение производительности мельницы до 25,5кг/ч. Максимальная производительность мельницы (рис. 2, в) 26,9 кг/ч достигается при коэффициенте загрузки барабана 0,4 и количестве выступов в футеровке – 8 шт. Во всех случаях при всех режимах работы мельницы характер кривых (рис. 2) монотонно возрастающий, т.е. с

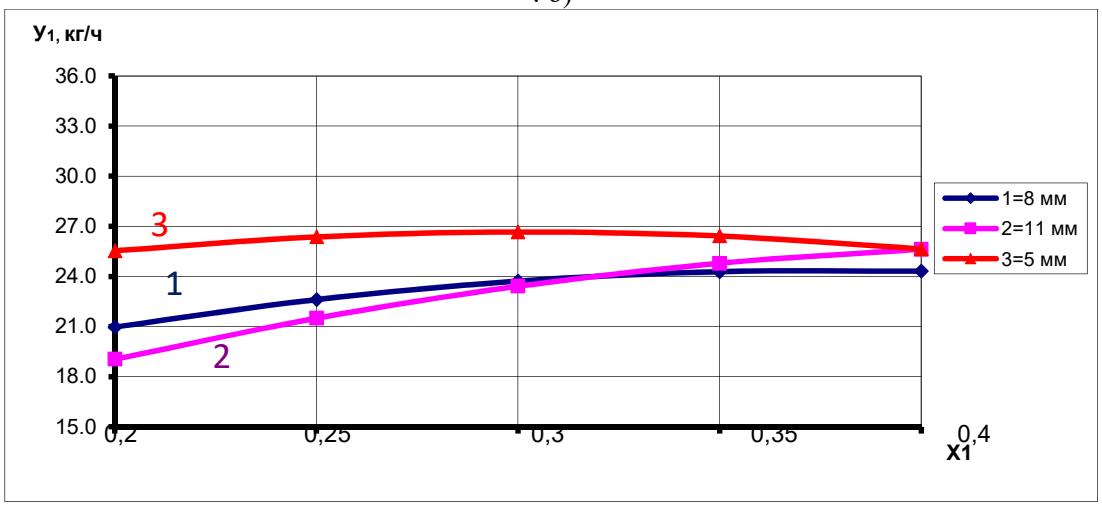
увеличением коэффициента загрузки производительность мельницы увеличивается в среднем на 27,6 %.

Зависимости удельного расхода энергии от глубины пазов в футеровке носит экстремальный характер (рис. 3) с точкой экстремума в районе, соответствующем глубине паза – 11мм. Минимальный расход энергии 31кВт.ч/т наблюдался при глубине пазов 2мм, количестве выступов – 8шт. Максимальный расход энергии 80кВт.ч/т соответствует режиму работы мельницы: глубина пазов 11мм, коэффициент загрузки 0,35 (рис. 3, б).

а)



. б)



в)

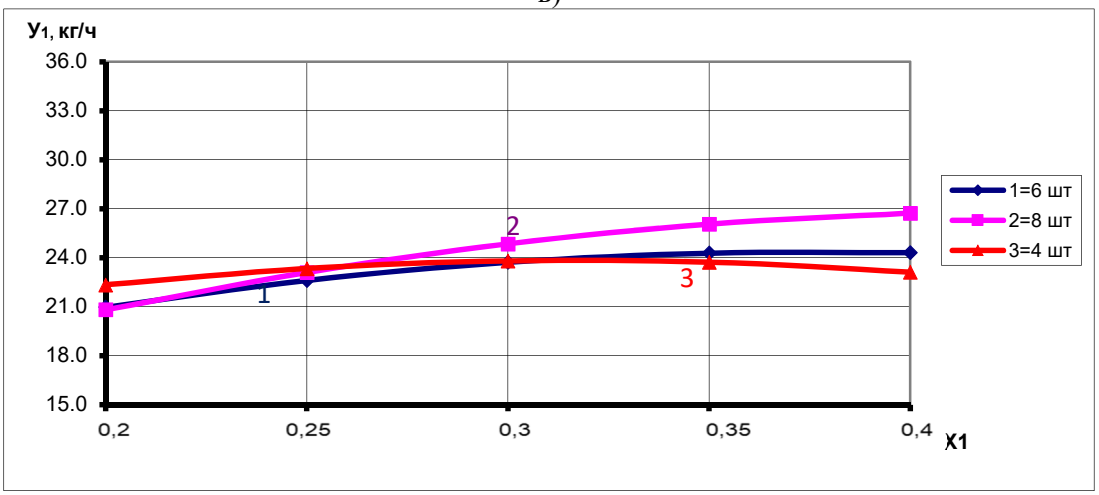
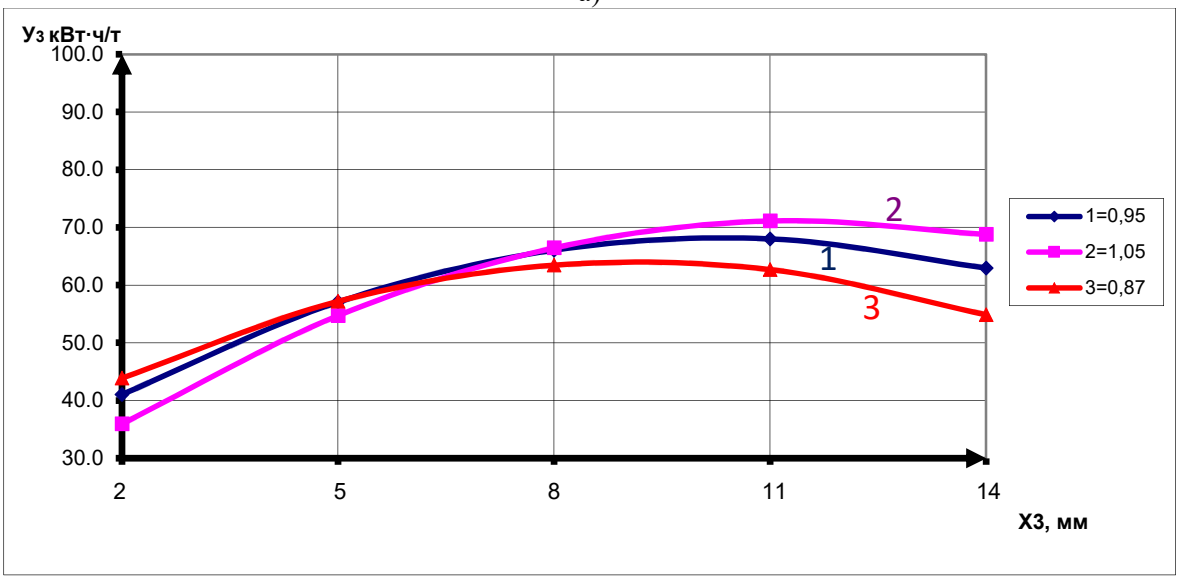
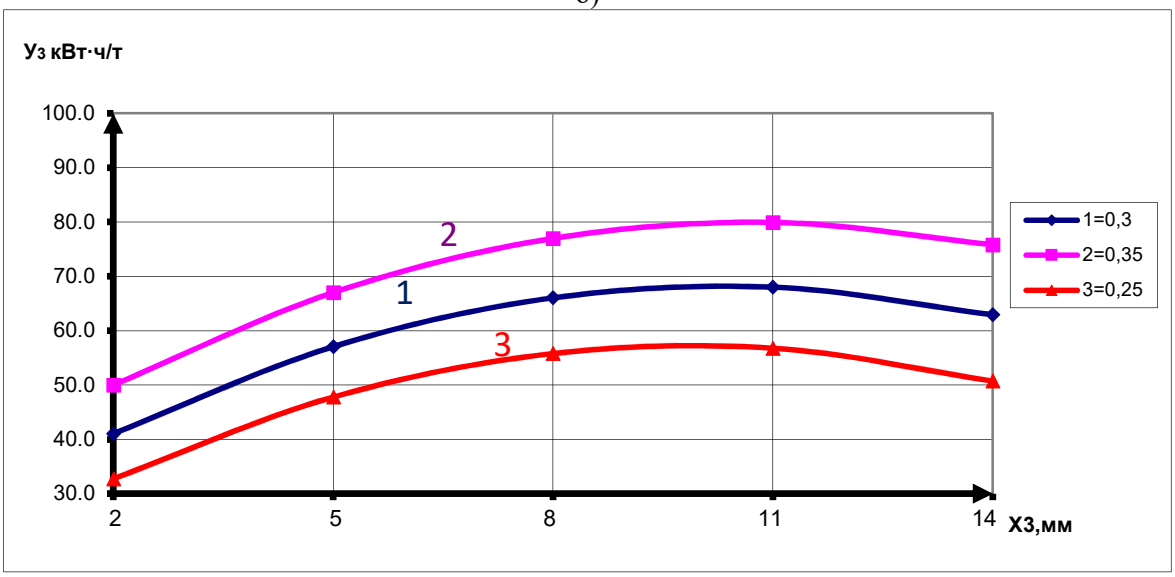


Рис. 2. Зависимость производительности $У_1(Q)$ от коэффициента загрузки барабана мельницы X_1 а) при различной частоте вращения барабана мельницы X_2. 1 – 0,95 $с^{-1}$;2 – 1,05 $с^{-1}$; 3 – 0,78 $с^{-1}$; б) при различной глубине пазов X_3. 1 – 8 мм; 2 – 11 мм; 3 – 5 мм; в) при различном количестве выступов X_4. 1 – 6 шт; 2 – 8 шт; 3 – 4 шт.

а)



б)



в)

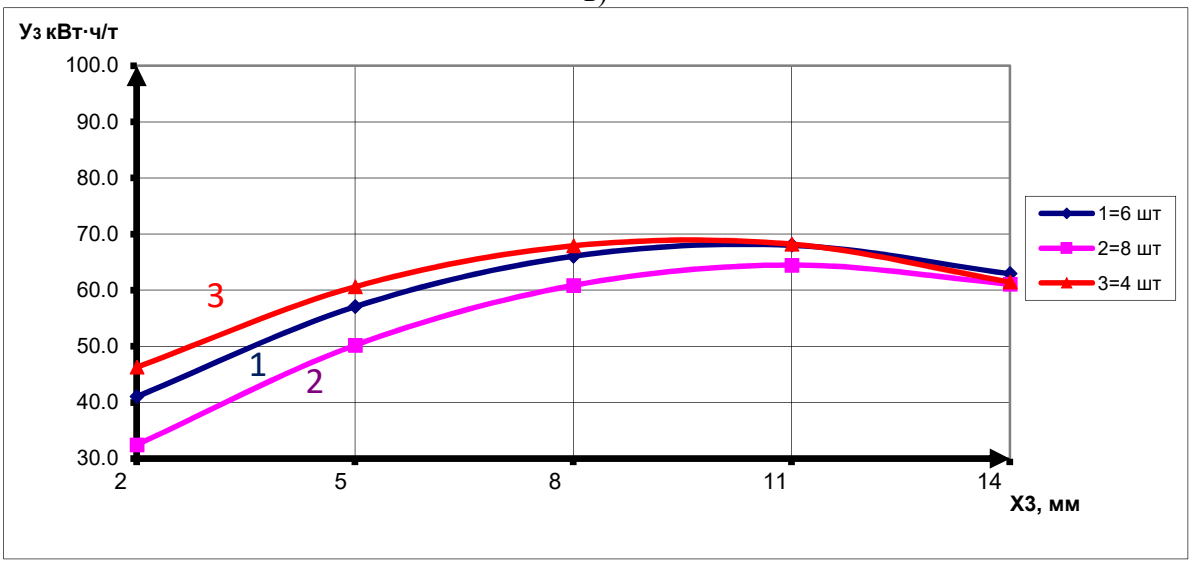
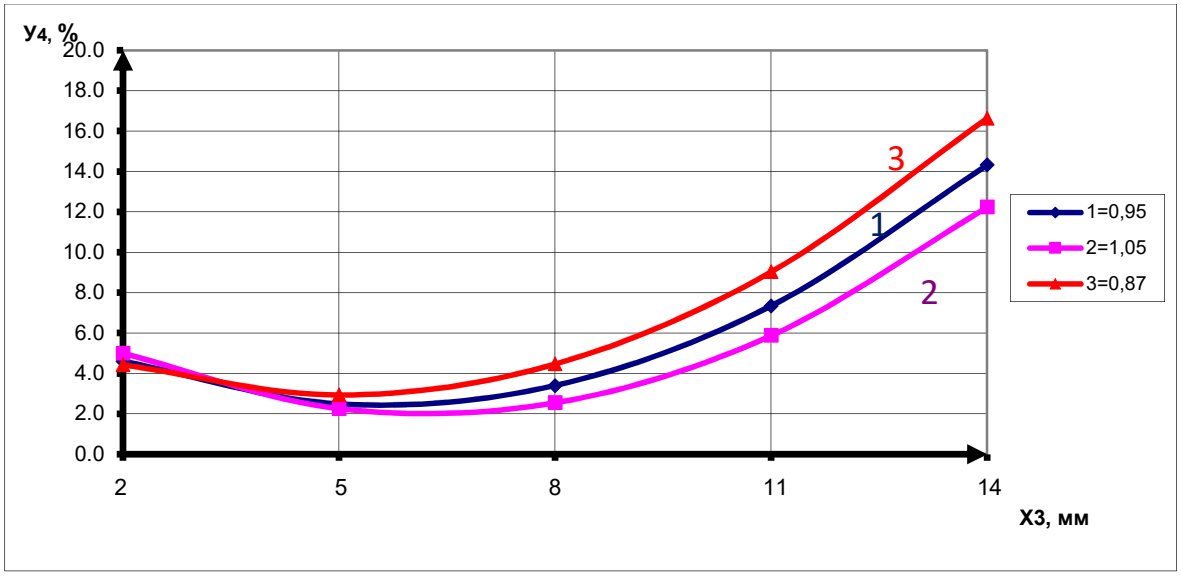
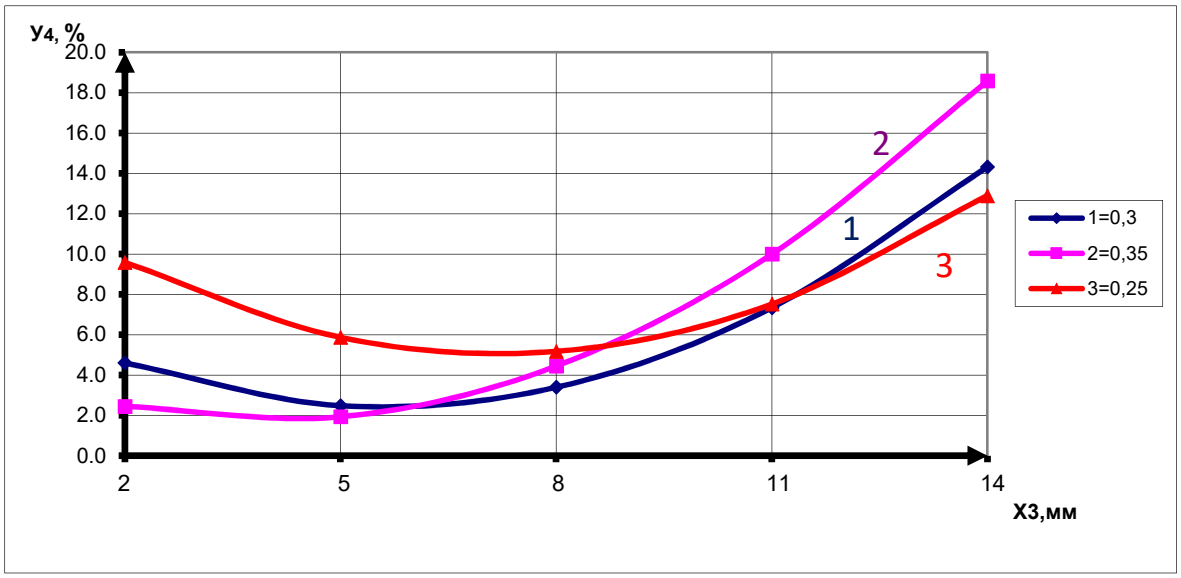


Рис. 3. Зависимость удельного расхода электроэнергии $У_3$ от глубины пазов X_3
а) при различном коэффициенте загрузки барабана мельницы X_1. 1 – 0,3; 2 – 0,35; 3 – 0,25;
б) при различной частоте вращения барабана мельницы X_2. 1 – 0,95 $с^{-1}$;2 – 1,05 $с^{-1}$; 3 – 0,78 $с^{-1}$;
в) при различном количестве выступов X_4. 1 – 6 шт; 2 – 8 шт; 3 – 4 шт

а



б



в

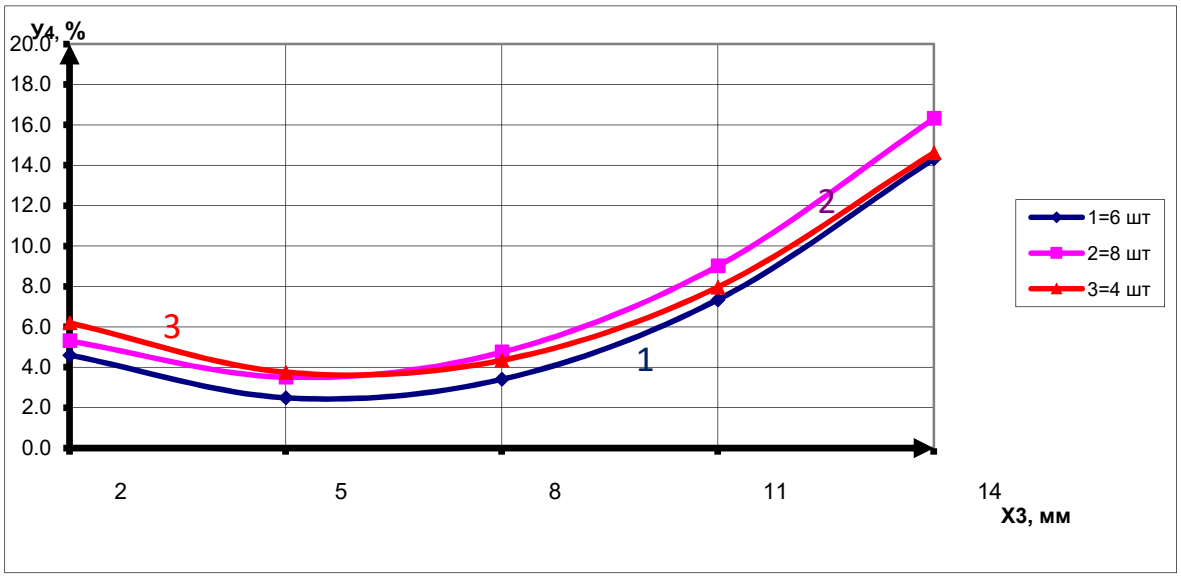


Рис. 4. Зависимость остатка на сите 008 от глубины пазов X_3
а) при различном коэффициенте загрузки барабана мельницы X_1. 1 – 0,3;2 –0,35; 3 – 0,25;
б) при различной частоте вращения барабана мельницы X_2. 1 – 0,95 $с^{-1}$;2 – 1,05 $с^{-1}$; 3 – 0,78 $с^{-1}$;
в) при различном количестве выступов X_4. 1 – 6 шт; 2 – 8 шт; 3 – 4 шт

Зависимость тонкости помола от глубины пазов в футеровке при всех режимах работы мельницы также носит экстремальный характер в зоне минимума, характеризуемой глубиной пазов в футеровке – 5мм (рис. 4). Например, при глубине паза 2 мм, коэффициенте загрузки 0,35 остаток на сите 008 составляет 2,0 %. а с увеличением глубины паза до 14мм помол загрубляется и остаток на сите 008 возрастает до 18 % (рис. 4, б). Это объясняется тем. что самые крупные мелющие тела удерживаются в глубоких пазах и интенсивно перемещаются в водопадном режиме измельчая частицы материала преимущественно ударом. Для получения тонкомолотого материала целесообразно использовать режим работы мельницы, представленный на графике рис.4, в – глубина пазов должна быть в пределах 2–8 мм, количество выступов в пазах 4–6 шт, коэффициент загрузки барабана мельницы 0,35.

Уравнения регрессии (2)–(4), полученные в результате многофакторного эксперимента, позволяют установить рациональные значения параметров X_1, X_2, X_3, X_4, при которых процесс измельчения происходит наиболее эффективно. Однако определение рационального режима работы шаровой барабанной мельницы представляет собой совместный анализ полученных зависимостей функций отклика от варьируемых факторов, которые необходимо рассматривать совместно, т.к. их общее взаимодействие дает наиболее полное представление о процессах, происходящих в мельнице, возможность их контроля и регулирования.

Для выявления рациональных конструктивно – технологических параметров шаровой барабанной мельницы были рассмотрены совместные зависимости производительности, удельного расхода энергии, остатка на сите 008, удельной поверхности от коэффициента загрузки, частоты вращения барабана мельницы, глубины пазов в футеровке и количества выступов в пазах футеровки.

$$(Q,G,R_{008},S)=f (X_1,X_2,X_3,X_4). \qquad (6)$$

К каждой из функций отклика предъявлялись следующие требования:

$$Q > \max ; q > \min ; R_{008} > \min ; S > \max . \qquad (7)$$

Максимальные значения производительности мельницы Q =34,9 кг/ч регистрируются при факторах X_1 = 0,3, X_2 = 0,95 $с^{-1}$, X_3 = 2мм, X_4= 8 шт (рис. 5). Следует отметить что при данных параметрах работы мельницы значения удельной поверхности измельчаемого материала S составили 2943,96 $см^2/г$, значения мощности P составили 1,7 кВт, удельных энергозатрат q составили 32,49 кВт·ч/т, а остаток на сите 008 составил 5,31 %.

Из приведенных на рис. 5 графических зависимостей следует, что максимальная производительность Q = 33,7 кг/ч достигается при уровнях факторов X_1 = 0,3, X_2 = 1,05 $с^{-1}$, X_3 = 2мм, X_4 = 6 шт. Следует отметить, что при данных параметрах работы мельницы значения удельной поверхности измельчаемого материала составила S = 2895,17 $см^2/г$, потребляемая мощность P = 1,6 кВт·ч, удельные энергозатраты g = 35,96 кВт·ч/т, остаток на сите 008 R_{008}= 5 %.

На основании проведенных экспериментальных исследований, анализа полученных результатов в виде уравнений регрессии и графических зависимостей нами были определены рациональные технологические и конструктивные параметры работы шаровой барабанной мельницы, оснащенной разработанной нами футеровкой: коэффициент загрузки барабана мельницы 0,30–0,35 ; частота вращения барабана мельницы 0,95–1,05 $с^{-1}$; глубина пазов в футеровке 5–11мм ; количество выступов 6–8 шт.

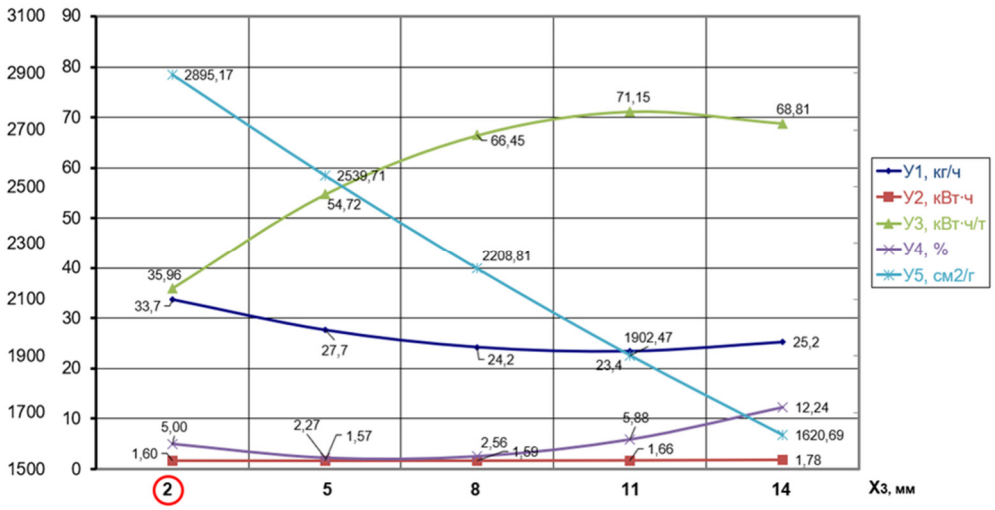


Рис. 5. График зависимостей функций отклика $У_1$, $У_2$, $У_3$, $У_4$, $У_5$ от X_3 – высоты выступов

Выводы. Проведенная нами работа по совершенствованию футеровки шаровой барабанной мельницы показала возможность существенно повысить эффективность процесса измельчения за счет принудительной классификации мелющих тел, которая исключает их поперечную и продольную сегрегацию. Такой тип футеровки может быть использован как при сухом, так и при мокром способе измельчения в мельницах, работающих по открытому и замкнутому циклах измельчения.

Источник финансирования. *Работа выполнена в рамках проекта № 22 – 29 – 01438 поддержанного Российским научным фондом с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Серго Е.Е. Дробление, измельчение, и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра, 1985. 285 с.
2. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. М.: Химия, 1977. 368 с.
3. Богданов В.С. Теоретические основы расчета усовершенствованных конструкций шаровых барабанных мельниц. Старый Оскол: ТНТ, 2023. 360 с.
4. Перов В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. М.: Недра. 1990. 301 с.
5. Крюков Д.К. Футеровка шаровых мельниц. М.: Недра, 1966. 174 с.
6. Богданов В.С., Анциферов С.И., Богданов Д.В., Хахале П.А. Оптимизация энергоэффективности футеровки шаровых барабанных мельниц // Цемент и его применение. 2021. №4. С. 38–41.
7. Воробъев Н. Д., Богданов В.С., Ельцов М.Ю. Математическая модель движения мелющих тел в барабанных мельницах. Общие принципы построения // Известия Вузов. Горный журнал. 1988. №8. С. 116–119.
8. Богданов В.С., Сухоруков И.Н., Богданов Д.В., Несмеянов Н.П. Проектирование футеровки шаровых барабанных мельниц // Цемент и его применение. 2024. № 2. С.48–51.
9. Шувалов С.И., Михеев П.Г. Распределение мелющих тел и размалываемого материала в поперечном сечении вращающегося барабана мельницы // Вестник ИГЭУ. 2019. Вып. 2. С. 1–7.
10. Хардер Й. Развитие одноэтапных процессов измельчения в цементной промышленности // Цемент Известь Гипс. 2006. № 1. С. 24–38.
11. Hander J. Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie // ZKG International. 2013. №03. Pp. 31–42.
12. Jorgensen S.W. Cement grinding-a Comparison between Vertikal Roller Vill and Ball Mill // Cement International. 2015. №02. Pp. 45–58.
13. Harde J. Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie // ZKG International. 2023. №03. Pp. 31–42.
14. Stoiber W. Comminution Technology and Energy Consumpton // Cemen International. 2023. Pp. 44–52.
15. А.с. 1316695 А1 (SU). Футеровка шаровой мельницы /Богданов В.С. и др. Опубл . в БИ. 1987. №22.
16. А.с. 2397813 (RU). Классифицирующая футеровка цементной мельницы / Богданов В.С. и др. Опубл.в БИ. 2010. № 24.
17. А.с. 1738341 А1 (SU). Футеровка трубной мельницы / Богданов В.С. и др. – Опубл. в БИ. 1992. № 21.

Информация об авторах:

Богданов Василий Степанович, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Сухоруков Илья Назимович, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: x910363@jndex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Богданов Денис Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: bogdanov.denis.v@gmail.com Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Несмеянов Николай Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: akademik.np@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, ул. Костюкова, д. 46 .

Поступила 10.12.2024 г.

© Богданов В.С., Сухоруков И.Н., Богданов Д.В., Несмеянов Н.П., 2025

Bogdanov V.S., Sukhorukov I.N. Bogdanov D.V. Nesmeyanov N.P.
Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov
**E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com*

OPTIMIZATION OF GRINDING PROCESS IN BALL MILL DRUM MILL

Abstract. *Ball drum mills have found wide application in many industries, where high hourly productivity of one unit is required, reaching several hundred tons of finished product - mining, energy, chemical and building materials industries. To date, the overall dimensions of mills have reached their limits, the world's largest mill has a diameter of 12 meters and a drum length of 36 meters, and its capacity is 3000 tons per hour. One of the main directions of improvement of mills is the development of such designs of inner-mill devices, which would increase the efficiency of the grinding process as a whole. A brief analysis of the design of ball drum mills, the efficiency of the grinding process is given. The authors describe the design of the lining proposed by the authors, which consists of standard plates, in which made transverse chutes diameter of chutes corresponds to the diameter of the grinding bodies, which are in this section of the drum of the mill. The diameter of the chutes decreases from loading to unloading. The interaction of lining with grinding bodies and its ability to prevent transverse and longitudinal segregation of grinding bodies is shown. In the course of search experiments the main factors influencing the classification of grinding bodies were revealed. These factors include: the coefficient of loading of the mill drum with grinding bodies; the rotation speed of the mill drum; the depth of the grooves of the lining; the number of projections in the grooves of the lining. As optimization parameters were chosen: mill productivity; power consumption of the drive; specific energy consumption; residue on sieve 008; specific surface of the finished product. The results of experimental studies in the form of regression equations and graphs are given. A comprehensive analysis of the influence of the studied factors and interaction effects on the formation of response function values and the efficiency of the grinding process as a whole has been carried out. For revealing of rational design and technological parameters of the ball drum mill and modes of its operation the dependences of mill productivity and specific energy consumption on its main factors have been jointly considered. Rational modes of operation of the ball drum mill equipped with a new design of lining have been established.*

Keywords: *ball mill, grinding bodies, segregation, grinding material*

REFERENCES

1. Sergo E.E. Crushing, grinding, and screening of minerals [Droblenie, izmel'chenie, i grohochenie poleznyh iskopaemyh]. Moscow : Nedra, 1985. 285 p. (rus)

2. Sidenko P.M. Shredding in the chemical industry [Izmel'chenie v himicheskoj promyshlennosti]. Moscow: Chemistry, 1977. 368 c. (rus)

3. Bogdanov V. S. Theoretical bases of calculation of the improved designs of ball drum mills [Teoreticheskie osnovy rascheta usovershenstvovannyh konstrukcij sharovyh barabannyh mel'nic]. Stary Oskol : TNT, 2024. 360 c. (rus)

4. Perov V.A. Crushing, grinding and screening of skid fossils [Droblenie, izmel'chenie i grohochenie poleznyh iskopaemyh]. Moscow: Nedra, 1990. 301 p. (rus)

5.Kryukov D.K. Lining of ball mills [Futerovka sharovyh mel'nic]. Moscow: Nedra, 1966. 174 c. (rus)

6.Bogdanov V.S., Antsiferov S.I., Bogdanov D.V., Khakhale P.A. Optimization of Energy Efficiency of Ball Drum Mill Lining [Optimizaciya energoeffektivnosti futerovki sharovyh barabannyh mel'nic]. Cement and its Application. 2021. No.4. Pp. 38–41. (rus)

7.Vorob'ev N. D., Bogdanov V.S., Eltsov M.Yu. Mathematical model of grinding bodies motion in drum mills. General principles of construction [Matematicheskaya model' dvizheniya melyushchih tel v barabannyh mel'nicah. Obshchie principy postroeniya]. Izv. Vuzov. Mining Journal. 1988. No.8. Pp. 116–119. (rus)

8.Bogdanov V.S., Sukhorukov I.N., Bogdanov D.V., Nesmeyanov N.P. Designing the lining of ball drum mills [Proektirovanie futerovki sharovyh barabannyh mel'nic]. Cement and its application. 2024. No.2. Pp. 48–51. (rus)

9.Shuvalov S.I., Mikheev P.G. Distribution of grinding bodies and grinding material in the cross-section of the rotating mill drum [Raspredelenie melyushchih tel i razmalyvaemogo materiala v poperechnom sechenii vrashchayushchegosya barabana mel'nicy]. Vestnik IHEU. 2019. Vol.2. Pp. 1–7. (rus)

10. Harder J. Development of one-stage grinding processes in cement industry [Razvitie odnoetapnyh processov izmel'cheniya v cementnoj promyshlennosti]. Cement Lime Gypsum. 2006. No.1. Pp. 24–38. (rus)

11. Hander J. Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie. ZKG International. 2013. No.03. Pp. 31–42.

12. Jorgensen S.W. Cement grinding-a Comparison between Vertikal Roller Vill and Ball Mill. Cement International. 2015. No. 02. Pp. 45–58.

13. Hander J. Moderne Mahltechnik in der Zementindustrie. ZKG International. 2023. No. 03. Pp. 31–42.

14.Stoiber W. Comminution Technology and Energy Consumpton. Cement International. 2023. No.02. Pp. 44–52.

15.A.c. 1316695 A1 (SU). Lining of a ball mill. Bogdanov V.S. et al. Published in BI, 1987, No. 22

.

16. A.c.2397813 (RU), Classifying lining of a cement mill. Bogdanov V.S. et al. Published in BI, 2010, No. 24.

17. A. c. 1738341 A1 (SU). Lining of a tube mill. Bogdanov V.S. et al. Published in BI, 1992, No. 21

Information about the authors

Bogdanov, Vasily S. Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: v.bogdanov1947@gmail.com. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str. 46.

Sukhorukov, Ilya N. Postgraduate student of the Mechanical Equipment Department. E-mail: x910363@jndex.ru. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Bogdanov, Denis V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Mechanical Equipment Department. E-mail: bogdanov.denis.v@gmail.com. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str. 46.

Nesmeyanov, Nikolay P. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Equipment. Mechanical equipment. E-mail: akademik.np@mail.ru. Belgorod State Technical University named after V.G. Shukhov, 308012, Belgorod, Kostyukova str. 46.

Received 10.12.2024

Для цитирования:
Богданов В.С., Сухоруков И.Н., Богданов Д.В., Несмеянов Н.П. Оптимизация процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 7. С. 122–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-122-132

For citation:
Bogdanov V.S., Sukhorukov I.N., Bogdanov D.V. Nesmeyanov N.P. Optimization of grinding process in ball mill drum mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 7. Pp. 122–132. DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-7-122-132