

https://doi.org/10.51885/3134-8009_IJS_2026_3_8

МРНТИ 67.29.35

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕПУСКНЫХ ПЕРЕГОРОДОК ПРУЖИННО-ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ

ӨНДІРІСТІК ҚАЛДЫҚТАРДЫ ҰНТАҚТАУ ТИІМДІЛІГІНЕ СЕРІППЕЛІ-ДИСКІЛІ ДИРМЕННІҢ АЙНАЛМА БӨЛІМДЕРІНІҢ ӘСЕРІН ЭКСПЕРИМЕНТТІК ЗЕРТТЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

EXPERIMENTAL STUDIES AND ANALYSIS OF THE EFFECT OF BYPASS WALLS OF A SPRING DISK MILL ON THE EFFICIENCY OF CRUSHING INDUSTRIAL WASTE

А.В. Вавилов ¹, В.С. Яковлев ^{2*}, А.Л. Воробьев ², А.И. Ким ³, Г.А. Гурьянов ²

¹ТОО «НПО ИННОТЕХ», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

²Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

³Университет «МИРАС», г. Шымкент, Казахстан

*Автор-корреспондент: Яковлев Владимир Сергеевич, e-mail: vjakovlev@ektu.kz

Ключевые слова:

Измельчение, пружинно-
дисковая мельница,
помольная камера,
тонкость помола,
удельная энергоёмкость,
пружинный рабочий
орган

АННОТАЦИЯ

В статье исследован рабочий процесс еще малоизученной пружинно-дисковой мельницы, измельчающей промышленные отходы. Одной из самых энергоёмких операций в горнодобывающей, химической, строительной и сельскохозяйственной отраслях является процесс измельчения, на долю которого может приходиться до 50 % общих энергозатрат предприятия. Статья посвящена повышению энергоэффективности и устойчивости рабочего процесса измельчения материалов в пружинно-дисковой мельнице, которые являются ключевыми вызовами в условиях современной технологической трансформации и ужесточения экологических норм. Оптимальные конструктивные новшества и режимы работы измельчительного оборудования могут привести к значительной экономии расходов электроэнергии, повышению качества конечного продукта, уменьшенному износу механизмов и, как следствие, к снижению эксплуатационных расходов. В статье рассматривается влияние диаметра проходного отверстия перепускных перегородок на продолжительность, производительность и тонкость помола. Даны графические зависимости и характеристика крупности материала, прошедшего/не прошедшего перепускную перегородку. Показано влияние на интенсивность измельчения зазоров между подвижными и неподвижными элементами помольной камеры и движение материала внутри помольной камеры в зависимости от размера проходного отверстия перепускной перегородки. Дан подробный анализ зависимости производительности мельницы от всех влияющих факторов.



Түйінді сөздер:

Ұнтақтау серіппелі-
дискілі диірмен, ұнтақтау
камерасы, ұнтақтау,
меншікті энергия
сыйымдылығы, серіппелі
жұмыс органы

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада өнеркәсіптік қалдықтарды ұнтақтайтын әлі де аз зерттелген пружинно-диск диірменінің жұмыс процесі зерттелді. Тау-кен, химия, құрылыс және ауыл шаруашылығы салаларындағы энергияны көп қажет ететін операциялардың бірі Ұсақтау процесі болып табылады, ол кәсіпорынның жалпы энергия шығынының 50 % дейін болуы мүмкін. Мақала қазіргі заманғы технологиялық трансформация мен экологиялық нормаларды қатаңдату жағдайында негізгі сын-қатерлер болып табылатын серіппелі-дискілі диірмендегі материалдарды ұнтақтаудың энергия тиімділігі мен жұмыс процесінің тұрақтылығын арттыруға арналған. Ұнтақтау жабдықтарының оңтайлы конструктивті жаңалықтары мен жұмыс режимдері Электр энергиясының шығындарын едәуір үнемдеуге, түпкілікті өнімнің сапасын арттыруға, механизмдердің тозуын азайтуға және нәтижесінде пайдалану шығындарын азайтуға әкелуі мүмкін. Мақалада помо-ланың ұзақтығына, өнімділігіне және нәзіктігіне айналма бөгеттердің өту тесігінің диаметрінің әсері қарастырылады. Қайта өңдеу бөлігінен өткен/өтпеген материалдың графикалық тәуелділігі мен өлшемдік сипаттамасы берілген. Ұнтақтау камерасының жылжымалы және қозғалмайтын элементтері арасындағы саңылауларды ұнтақтау қарқындылығына және айналма бөліктің өту саңылауының мөлшеріне байланысты ұнтақтау камерасының ішіндегі материалдың қозғалысына әсері көрсетілген. Барлық әсер етуші факторларға ұсақ-түйек өнімділіктің тәуелділігіне егжей-тегжейлі талдау берілген.

keywords:

Grinding spring disk mill,
grinding chamber, fineness
of grinding, specific energy
intensity, spring working
body

ABSTRACT

The article examines the workflow of a still little-studied spring-disc mill that grinds industrial waste. One of the most energy-intensive operations in the mining, chemical, construction and agricultural industries is the grinding process, which can account for up to 50% of the total energy consumption of an enterprise. The article is devoted to improving the energy efficiency and sustainability of the material grinding workflow in a spring disc mill, which are key challenges in the context of modern technological transformation and stricter environmental standards. Optimal design innovations and operating modes of shredding equipment can lead to significant savings in electricity costs, improved quality of the final product, reduced wear of mechanisms and, as a result, reduced operating costs. The article examines the effect of the diameter of the through hole of bypass burners on the duration, productivity and fineness of the pump. Graphical dependencies and characteristics of the size of the material that has passed/has not passed the bypass are given. The effect on the grinding intensity of the gaps between the movable and fixed elements of the grinding chamber and the movement of the material inside the grinding chamber, depending on the size of the passage opening of the bypass partition, is shown. A detailed analysis of the dependence of the mine's performance on all influencing factors is given.

ВВЕДЕНИЕ

Переработка или измельчение промышленных отходов с сохранением, а иногда и с преумножением их полезности, требует разработки нового энергоэффективного оборудования, способного выполнять более тщательную переработку исходного сырья с большей

производительностью и с меньшими затратами. Одним из путей интенсификации процесса измельчения является увеличение энергонапряженности измельчительных машин и концентрации энергии измельчения непосредственно на разрушение материала за счет ограничения возможности ухода материала из зоны действия разрушающих сил. В пружинно-дисковых мельницах такое ограничение можно создать использованием перепускных перегородок между парами пружинных дисков, задерживающих материал в зоне измельчения до достижения им требуемого качества (тонкости) готового продукта за счет размера проходных отверстий в перегородках, позволяющих материалу перетечь из одной зоны измельчения в следующую.

Пружинно-дисковые мельницы являются широко используемыми, но малоизученными измельчителями. Известны пружинные мельницы шаровые (Сиваченко и Добровольский, 2012; Баловнев и др., 1991; Унаспеков и др., 2015), каскадные (Данилов, 1998), изогнутые и комбинированные (Сиваченко и др., 1990), игольчатые (Севастьянов и др., 2015; Севастьянов и др., 2018) и другие. Рассмотрим рабочий процесс пружинно-дисковой мельницы, мелющими элементами в которой выступают два вращающихся в помольной камере навстречу друг другу пружинных диска. Диски вращаются с одинаковой скоростью, поэтому могут безударно входить в зацепление, образуя зону сверхтонкого измельчения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная мельница с дисковым пружинным (иногда пружинящими скобами) рабочим органом содержит корпус 5, помольную камеру объемом 5 л; внутри камеры в виде дисков вращаются пружинные рабочие элементы 3, выполненные из стали 65Г; загрузочный патрубок 1 и выгрузочный люк 4, электродвигатель привода мощностью 15 кВт 6 (рис. 1).

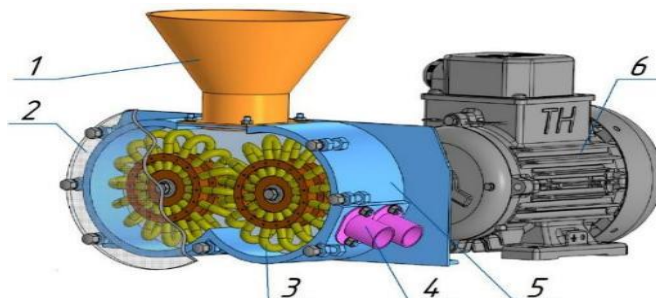


Рисунок 1. Экспериментальная мельница с дисковым пружинным рабочим органом
Примечание – составлено авторами

Помольные камеры (рис. 2), образуемые сборным корпусом мельницы и вращающимися пружинными дисками, можно расширять, чередуя на валу пары пружинных дисков, разделенных перепускной перегородкой 13 с проходными отверстиями разного диаметра, что приведет к увеличению производительности при сохранении качества готового продукта. Для каждой пары пружинных дисков можно делать отдельный выгрузочный люк, а можно оставить его только на дальней от двигателя секции для выпуска готового продукта заданной тонкости. Регистрация частоты вращения дисков осуществлялась с помощью датчика 3 тахометра 4 (рисунок 2). Регистрация мощности производилась по ваттметру 2, подключенному к линии питания приводного двигателя. На стенде (рис. 1, 2) также можно исследовать влияние изменения межосевого расстояния пружинных дисков, приводящего к перекрытию витков пружины, на производительность и тонкость готового продукта измельчения.

Измельчаемый материал подают через загрузочный люк в первую помольную камеру, где он попадает под воздействие дисковых пружин. Помол материала происходит в трех условных зонах. Вначале (1 зона) материал разбивается от удара витков пружинных дисков и от собственного соударения частиц материала. Затем (2 зона) материал раздавливается и истирается пружинными дисками о стенки помольной камеры. В заключение (3 зона) материал истирается и раздавливается между витками пружинных дисков в зоне их перекрытия и отбрасывается к стенкам камеры центробежными силами.

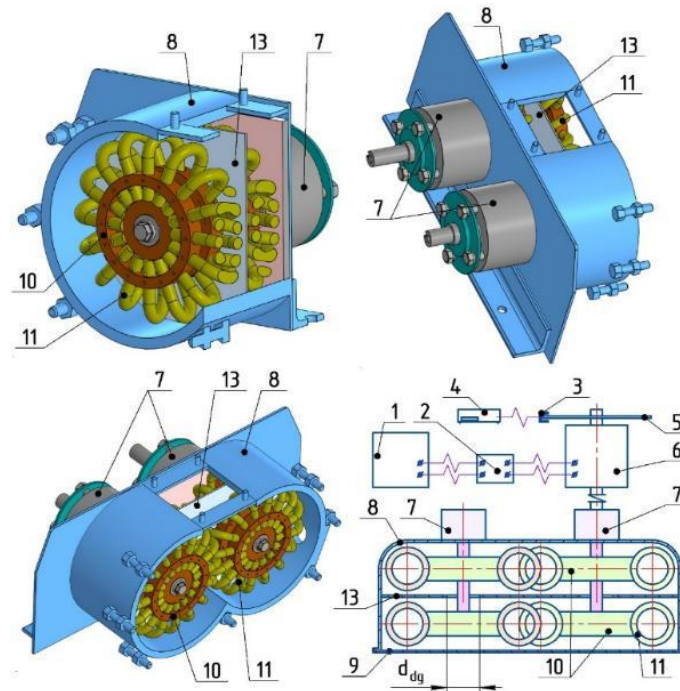


Рисунок 2. Мельница с разделенными перепускной перегородкой помольными камерами с парой пружинных дисков: 1) источник питания; 2) ваттметр; 3) датчик тахометра; 4) тахометр; 5) диск; 6) электродвигатель привода; 7) подшипниковые опоры; 8) корпус; 9) передняя стенка; 10) пружинный диск; 11) полость пружины; 13) перепускная перегородка

Примечание – составлено авторами

Под действием дисковых пружин измельчаемый материал проходит все 3 зоны измельчения. Затем измельченный материал поднимается до уровня перепускных отверстий в перегородках, в которых проходит приводной вал пружинных дисков, и пересыпается в следующую помольную камеру со второй парой пружинных дисков. Перепускное отверстие в перегородке может быть различного диаметра, что позволяет предварительно измельченному материалу достигать его в разное время согласно тонкости помола. При более крупном отверстии и фракции переходящего материала крупнее. Исследование режима измельчения делилось на два этапа.

В процессе эксперимента анализировались взаимодействие мелющих дисковых пружин с измельчаемым материалом и характер движения материала в камере измельчения (Сорокин и Чжоу, 2018; Lee, 2007; Yildirim, 2012). Устанавливались закономерности, характеризующие влияние количества оборотов дисковых пружин, объема заполнения мелющим материалом помольной камеры, величины перекрытия дисковых пружин, величины свободного зазора и диаметра перепускного отверстия

корпусных перегородок на тонкость измельчения и производительность пружинно-дисковой мельницы. Изначально характер движения материала внутри мельницы был проверен на природном известняке и на эквивалентном материале, получаемом соединением малоабразивного порошка и воды в произвольной пропорции. Материал бесперебойно через загрузочный патрубок подавался на вращающиеся дисковые пружины внутри помольной камеры, доступно размельчался и за счет косоустановленных витков дисковых пружин перемещался вдоль корпуса помольной камеры к отверстию разгрузочного люка. Тонкость готового продукта определялась набором контрольных сит. Влияние на тонкость продукта и производительность мельницы температуры и влажности окружающей среды и исходного материала, наличие в материале поверхностно-активных веществ (ПАВ) в задачи анализа не входили.

В процессе эксперимента варьировались параметры: частота вращения пружинных дисков n , степень загрузки пространства помольной камеры K_M , величина перекрытия витков дисковых пружин A , зазор между пружинными дисками и стенками помольной камеры X , протяженность измельчения t .

При проведении основных экспериментов измельчаемым материалом служила мраморная крошка с размером фракций 5-7 мм и следующими физико-механическими свойствами: предел прочности на сжатие $\sigma_{sz}=110$ МПа; модуль упругости материала $E = 55 \cdot 10^3$ МПа; объемный вес материала $\rho = 2,6 \text{ т/м}^3$, а также известковая крошка с физико-механическими свойствами: $\sigma_{sz}=80$ МПа; $E = 35 \cdot 10^3$ МПа; $\rho = 2,4 \text{ т/м}^3$.

Показателями конечных результатов измельчения в пружинно-дисковой мельнице приняты: критерий качества - тонкость помола на контрольном сите R_{-71} (с ячейкой 71 мкм), производительность мельницы P , кг/ч, мощность привода N , кВт, удельная энергоемкость $E_{ud} = N/P$ и удельная металлоемкость $M_{ud} = G/P$.

Тонкость помола в эксперименте выступала в роли оценки экономии энергетических и материальных затрат при измельчении на пружинно-дисковой мельнице. Материальные затраты на производство единицы продукции сильно зависят от производительности и затрат энергии на рабочий процесс пружинно-дисковой мельницы. Через приведенные показатели сложно оценить конечную тонкость продукта.

Предложенная методология способна комплексно решить задачу оптимизации рабочего процесса измельчения в пружинно-дисковой мельнице, начиная от методики эксперимента и завершая разработкой инженерных производственных рекомендаций по настройке оборудования.

В эксперименте, на специальном лабораторном стенде (рис. 1, 2), был рассмотрен вопрос, практически ранее никем не рассмотренный: исследование влияния размеров проходных отверстий в перепускных перегородках и их установка относительно пары пружинных дисков на производительность и тонкость измельчения в пружинно-дисковой мельнице. Конструкция лабораторной пружинно-дисковой мельницы позволяла установку между парами пружинных дисков перепускных перегородок (рис. 2, позиция 13) с различными проходными отверстиями по центру осей каждого из пружинных дисков. Перепускные перегородки были установлены с зазором от 2 до 12 мм от торцов пружинных дисков.

Диаметры проходных отверстий в перепускных перегородках, через которые также проходят приводные валы пружинных дисков, изменялись в пределах от 40 до 100 мм.

В процессе измельчения измельченный материал начинает накапливаться в помольной камере и постепенно ее наполнять. Причем более крупные и более тяжелые фракции центробежной силой отбрасываются к стенкам корпуса и продолжают измельчаться, а более мелкие фракции как пена поднимаются в общей массе вплоть до проходных отверстий перепускных перегородок (рисунок 3) и через них выходят в

следующую полость, в которой может стоять дополнительная пара пружинных дисков или контрольные сита.

В процессе эксперимента каждую минуту на контрольном сите замерялась тонкость измельченного материала, а также масса измельчаемого материала, уже прошедшего через проходное отверстие перепускной перегородки. Пределы изменения проходных отверстий выбраны с целью более полного изучения влияния, оказываемого перепускными перегородками. В ходе проведения опытов было установлено, что величина проходного отверстия перепускной перегородки оказывает влияние на направление движения материала.



Рисунок 3. Перепускные перегородки с различными проходными отверстиями в них
Примечание – составлено авторами

Установленная после перепускной перегородки дополнительная пара пружинных дисков в эксперименте иногда снималась, а образовавшаяся вместо них полость служила приемной емкостью для готового продукта измельчения (рисунок 4).

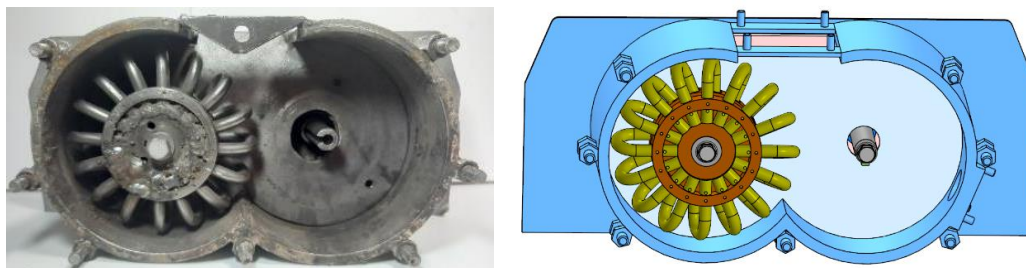


Рисунок 4. Физическая и 3D-модель сборки 2-й секции – установка/снятие ведомого рабочего диска и образование приемной емкости
Примечание – составлено авторами

В зависимости от диаметра проходного отверстия в перепускной перегородке менялись поведение и направление движения измельчаемого материала внутри помольной камеры.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Схемы, показывающие изменения направления движения материала, представлены на рисунке 5. При малой величине проходного отверстия перепускной перегородки $d_{dg} \ll D_{sr}$, рисунок 5, б ($d_{dg} = 40$ мм; $D_{sr} = 80$ мм), значительная часть материала, прошедшего торцевой зазор, идет снова в рабочую зону, и только малый объем материала проходит через проходное отверстие перепускной перегородки в следующую ступень измельчения. При такой работе снижается производительность, повышается

энергоёмкость процесса. Вариант, когда величина проходного отверстия перепускной перегородки значительно больше среднего диаметра пружинного диска $d_{dg} \gg D_{sr}$, рисунок 5, г ($d_{dg} = 100$ мм; $D_{sr} = 80$ мм), дает падение эффективности измельчения по достижении материалом требуемой тонкости.

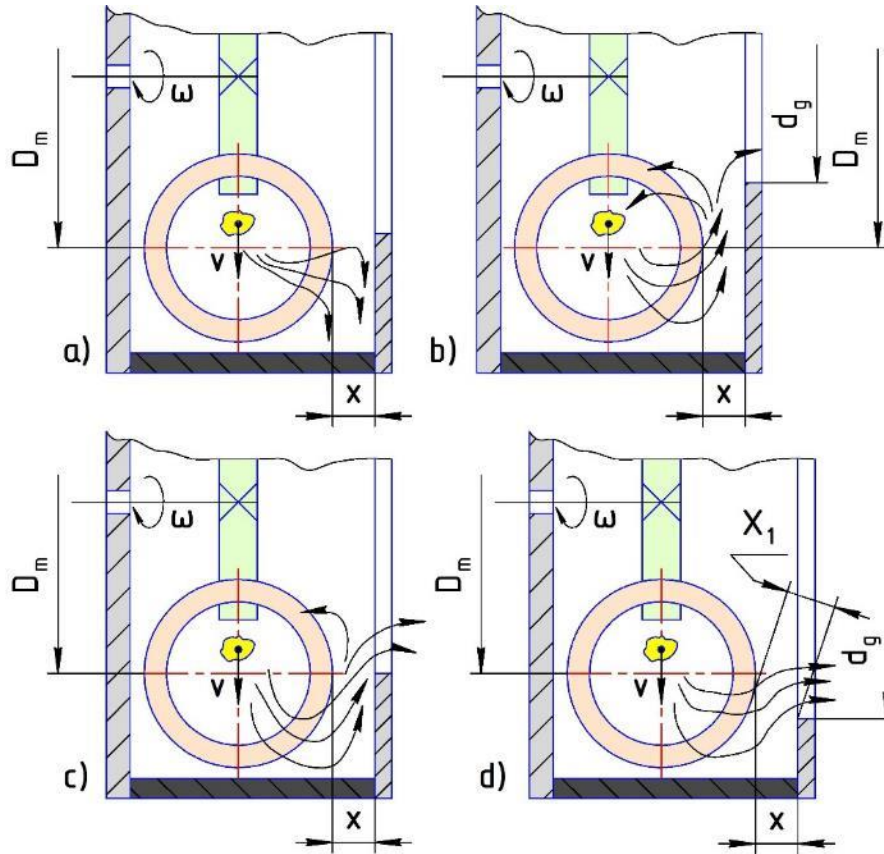


Рисунок 5. Движение материала в зависимости от размера проходного отверстия перепускной перегородки: X – торцевой зазор; D_{sr} – средний диаметр пружинного диска; d_{dg} – диаметр проходного отверстия перепускной перегородки:

a) $d_{dg} \approx D_{sr}$; $X \gg 2$ мм; b) $d_{dg} < D_{sr}$; c) $d_{dg} \approx D_{sr}$; d) $d_{dg} > D_{sr}$

Примечание – составлено авторами

Торцевой зазор X перестает выдерживаться, так как на самом деле устанавливается зазор X' , который больше X . Чем больше разница между D_{sr} и d_{dg} , тем больше будет разница и между X и X' . С увеличением проходного отверстия перепускной перегородки снижается ее регулирующая способность. Наиболее оптимальными являются перепускные перегородки с проходным диаметром, равным или несколько меньшим среднего диаметра пружинного диска (рисунок 5, c). При этом будет выдерживаться заданный торцевой зазор и обеспечиваться эффективное измельчение. Основная часть материала под действием потока воздуха и накопленной кинетической энергии переходит в зону действия другой пары пружинных дисков, и лишь незначительная часть материала возвращается на повторный цикл в первую зону. Это подтверждается данными, полученными экспериментально и представленными на рисунках 6, 7. На рисунке 6, б представлена зависимость мощности привода и удельной энергоёмкости от диаметра проходного отверстия перепускной перегородки. С увеличением проходного отверстия перепускной перегородки растет и производительность. Некоторое падение пропускной

способности на отрезке 80-100 мм по отношению к отрезку 40-80 мм для зазоров 7 и 12 мм объясняется застигиванием материала у нижнего среза перепускной перегородки.

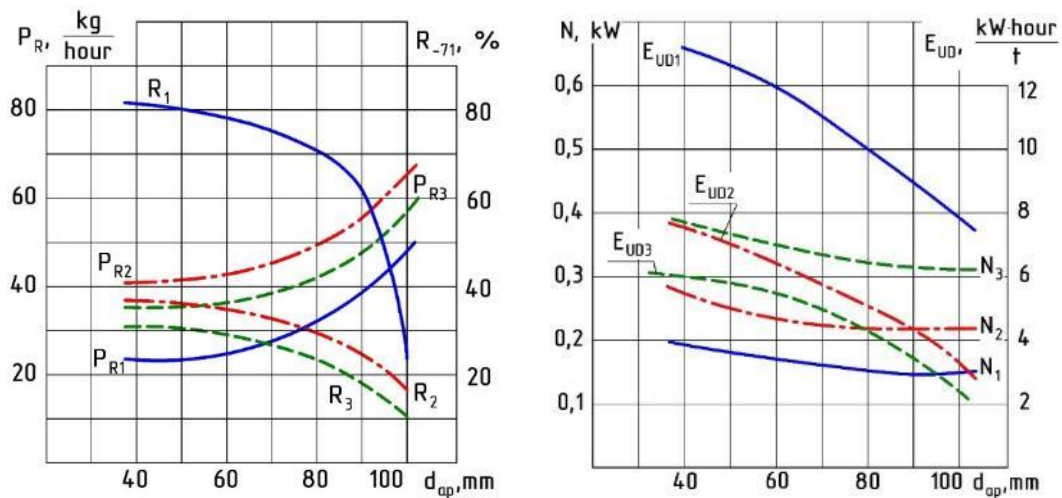


Рисунок 6. Зависимость производительности P и тонкости R_{-71} (а) и потребляемой мощности N и удельной энергоёмкости E_{ud} (б) от величины проходного диаметра перегородки d_{ag} при разном торцевом зазоре X в помольной камере:
1) $X=2$ мм; 2) $X=7$ мм; 3) $X=12$ мм

Примечание – составлено авторами

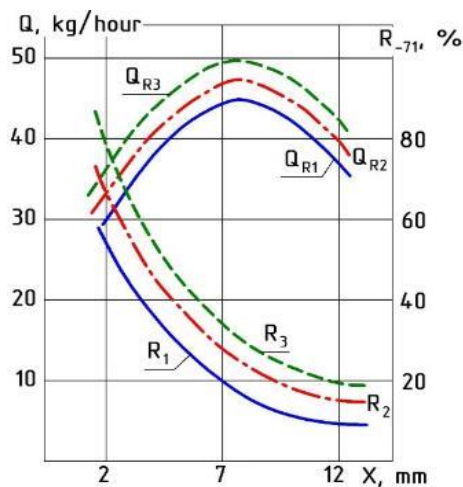


Рисунок 7. Зависимость производительности P и тонкости измельчения R_{-71} от величины торцевого зазора X при разном числе оборотов пружинных дисков n :
1) $n=1500$ об/мин; 2) $n=2000$ об/мин; 3) $n=2500$ об/мин

Примечание – составлено авторами

Находясь на удалении от рабочих элементов пружинных дисков (рисунок 8), материал имеет небольшую кинетическую энергию и не может преодолеть перепускной перегородки (рисунок 7) (Yu & Hao, 2012; Yu & Hao, 2013). Резкий скачок увеличения пропускной способности на отрезке 80-100 мм при торцевом зазоре 2 мм указывает на то, что истинная величина зазора больше установленной, так как при этом значении диаметра перепускной перегородки падает степень измельчения. Пропускная способность перепускной перегородки зависит не только от диаметра проходных отверстий, но и от

числа оборотов пружинных дисков. На рисунке 7 представлена зависимость производительности и тонкости помола от величины проходного отверстия перегородки при различных числах оборотов пружинных дисков.



Рисунок 8. Различное исполнение рабочих элементов пружинно-дисковой мельницы
Примечание – составлено авторами

Пропускная способность и тонкость измельчения увеличиваются с увеличением числа оборотов. Это происходит за счет увеличения числа воздействий рабочих органов на материал, вследствие чего возрастает энергия воздействия, увеличивается скоростной напор воздуха, который способствует увеличению пропускной способности (Ганбат и Гаврюшин, 2007; Иванников и др., 2018; Бадиков и Сорокин, 2008). Низкая пропускная способность при малых торцевых зазорах объясняется торможением материала силами трения и невозможностью прохождения большого количества материала через малое сечение. Наибольший пик лежит в районе 7 мм, после которого происходит падение пропускной способности вследствие скапливания материала у нижнего среза перепускной перегородки и торможения. Чем дальше материал располагается от рабочих органов пружинных дисков, тем меньшую кинетическую энергию он имеет, тем большее действие оказывают силы трения и силы тяжести, препятствующие продвижению материала. При высоких скоростях вращения зазор оказывает меньшее влияние на пропускную способность перепускных перегородок, так как при этом доминирует воздействие на материал скорости воздушного потока.

При проведении экспериментов был зарегистрирован эффект сепарации материала при прохождении им перепускной перегородки. Фракционный состав продукта измельчения, прошедшего перепускную перегородку, отличался от фракционного состава материала, не прошедшего перепускную перегородку, наличием более мелкой фракции, отсутствием частиц материала большого размера. Таким образом, помимо измельчительной роли, торцевой зазор и размер перепускного отверстия выполняют калибровочную роль: они пропускают частицы материала, достигшие величин меньших, чем зазор или проходное отверстие, задерживают и доизмельчают крупные.

На рисунках 9 и 10 приведены характеристики крупности продукта измельчения при разных диаметрах отверстий перепускных перегородок. Для получения сравнительной количественной оценки была построена зависимость средней крупности (размер круглого перепускного отверстия, сквозь которое проходит 50% всех зерен материала по массе) от проходного диаметра отверстия перепускной перегородки (рисунки 11, 12). Эффект сепарации больше всего проявляется при проходном отверстии перепускной перегородки, равном 40 мм. При этом значении наибольшая разница между средними крупностями прошедшего и не прошедшего перепускную перегородку материала, рисунок 13, а, соответственно $R_{sr}=50$ мкм и $R_{sr}=85$ мкм. При увеличении диаметра проходного отверстия эта разница уменьшается, что указывает на снижение эффекта сепарации. На рисунках 9 и 10 приведены характеристики крупности продукта

измельчения при разных торцевых зазорах, соответственно прошедшего и не прошедшего перепускную перегородку. На рисунке 13, б представлена зависимость средней крупности материала от величины торцевого зазора. При изменениях торцевого зазора наибольший сепарационный эффект наблюдается при зазоре 2 мм. Средняя крупность материала, прошедшего перепускную перегородку, $R_{sr}=70$ мкм, не прошедшего – $R_{sr}=105$ мкм. Разница составляет 35 мкм. Наибольший эффект сепарации достигается при малых диаметрах проходных отверстий перепускных перегородок и малых торцевых зазорах. Учет данного эффекта дает возможность получения более однородного продукта по фракционному составу.

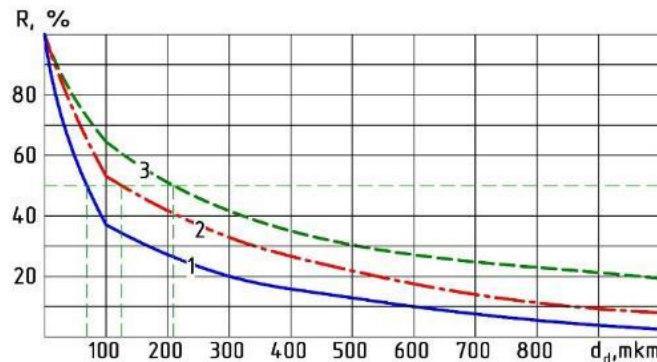


Рисунок 9. Материал, прошедший перепускную перегородку при $d_{dg} = 80$ мм:
1) $X=2$ мм; 2) $X=7$ мм; 3) $X=30$ мм

Примечание – составлено авторами

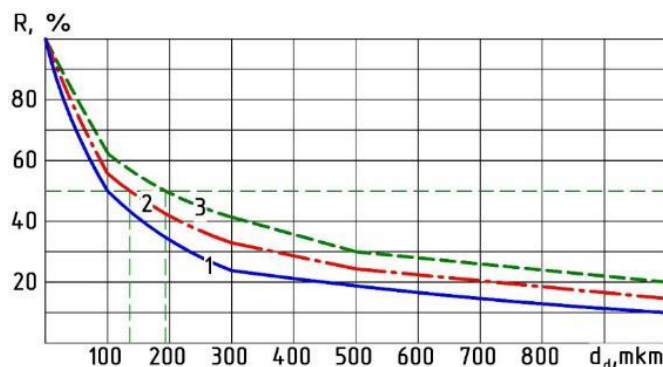


Рисунок 10. Материал, не прошедший перепускную перегородку при $d_{dg} = 80$ мм:
1) $X=2$ мм; 2) $X=7$ мм; 3) $X=30$ мм

Примечание – составлено авторами

Уменьшение диаметра проходного сечения перепускной перегородки и величины торцевого зазора приводит к резкому увеличению потребляемой мощности. При малых торцевых зазорах изменение проходного диаметра приводит к большим изменениям потребляемой мощности, чем при больших торцевых зазорах. Это связано с тем, что при больших торцевых зазорах материал более свободно уходит из зоны активного измельчения и имеет больше возможностей перераспределяться внутри помольной камеры, уйти от действия разрушающих сил. В пользу этого говорит и то, что степень измельчения при этом снижается.

Анализируя графические зависимости на рисунке 6, можно определить рациональные размеры проходного диаметра перепускной перегородки и величины

зазора, с которым необходимо устанавливать перепускную перегородку при получении минерального порошка.

Самое максимальное значение обобщенный показатель эффективности имеет при $d_{dg} = 80$ мм и торцевом зазоре 2 мм (рисунок 14). В данной установке использовались пружинные диски с внешним диаметром 120 мм и средним диаметром 80 мм. Это указывает на то, что наилучших результатов можно добиться при равенстве размеров среднего диаметра пружинных дисков и проходного отверстия перепускной перегородки.

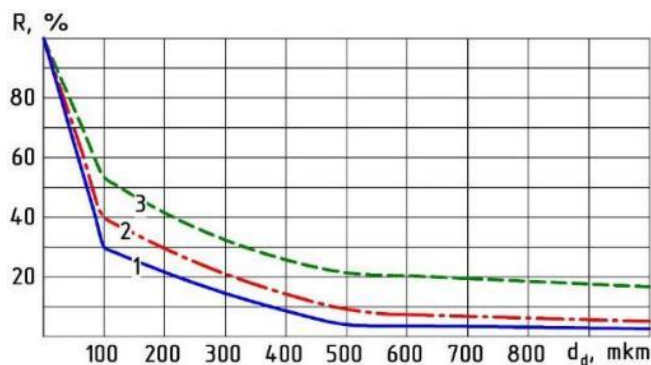


Рисунок 11. Характеристика крупности материала, прошедшего перепускную перегородку при $X=2$ мм: 1) проходной диаметр перепускной перегородки 40 мм; 2) проходной диаметр перепускной перегородки 80 мм; 3) проходной диаметр перепускной перегородки 100 мм

Примечание – составлено авторами

Это указывает на то, что наилучших результатов можно добиться при равенстве размеров среднего диаметра пружинных дисков и проходного отверстия перепускной перегородки.

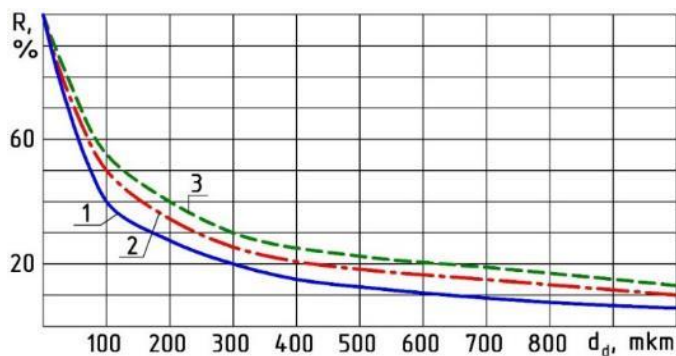


Рисунок 12. Характеристика крупности материала, не прошедшего перепускную перегородку при торцевом зазоре $X=2$ мм: 1) проходной диаметр перепускной перегородки 40 мм; 2) проходной диаметр перепускной перегородки 80 мм; 3) проходной диаметр перепускной перегородки 100 мм

Примечание – составлено авторами

Для рациональных параметров определим коэффициенты K_X и K_C , которые влияют на транспортную производительность мельницы. Из полученных графических зависимостей (рисунок 7) видно, что производительность и тонкость измельчения активно меняют свои значения на участках изменения d_{dg} от 60 до 100 мм и изменения X от 2 до 7 мм. Эти значения задают область определения коэффициентов K_X и K_C .

Экспериментальные данные позволяют сделать следующий вывод: для обеспечения тонкости измельчения, удовлетворяющей минеральному порошку, необходимо выдерживать торцевой зазор в пределах 2 мм.

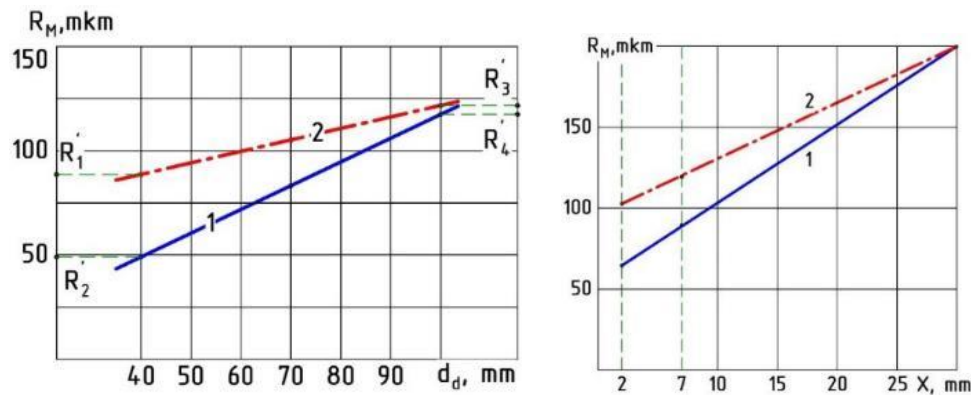


Рисунок 13. Зависимость величины средней крупности материала от диаметра перепускной перегородки d_{dg} (а) и от величины торцевого зазора (б):

1) материал, прошедший перепускную перегородку; 2) материал, не прошедший перепускную перегородку

Примечание – составлено авторами

Оперативное изменение степени измельчения рационально добавится увеличением проходного отверстия перепускной перегородки. Сохраняя постоянный торцевой зазор и варьируя проходным диаметром, мы получаем больше возможности регулировать степень измельчения, чем при варьировании торцевым зазором при постоянном диаметре проходного отверстия.

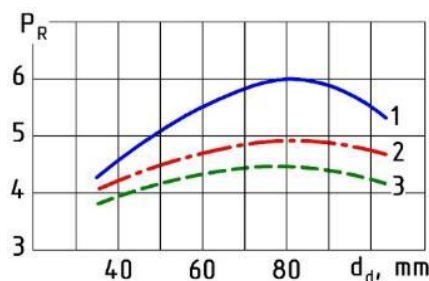


Рисунок 14. Зависимость обобщенного показателя эффективности P_R от величины проходного диаметра перепускной перегородки d_{dg} при различном торцевом зазоре X :

1) $X=2$ мм; 2) $X=7$ мм; 3) $X=12$ мм

Примечание – составлено авторами

Исходя из этого, важно определить, как меняются коэффициенты K_x и K_c с изменением диаметра проходного отверстия перепускной перегородки при постоянном торцевом зазоре. При этом, если будет меняться только проходной диаметр, коэффициент K_x будет оставаться постоянным, а при варьировании вносить только коэффициент K_c . Поэтому для расчетов производительности мельницы по производству минерального порошка достаточно знать суммарное влияние, оказываемое коэффициентами K_x и K_c на производительность. Обозначив суммарное влияние коэффициентом K , получим график его изменения в зависимости от варьирования проходного диаметра перепускной перегородки с учетом производительности расчетным путем (рисунок 15, б).

Для возможности расчета мельниц с различными диаметрами пружинных дисков D_p представим изменение проходного отверстия d_{dg} в виде изменения d_{dg}/D_p .

С помощью интерполяции графика можно получить аналитическое выражение изменения коэффициента K в зависимости от величины проходного диаметра перепускной перегородки:

$$K(X) = 19 \cdot 10^{-3} \cdot X^2 - 14,5 \cdot 10^{-3} X + 7 \cdot 10^{-3}, \quad (1)$$

где X – величина отношения d_{dg}/D_p .

Зависимость справедлива на участке изменения d_{dg}/D_p от 0,5 до 0,85 при максимальном D_p до 0,4 и торцевом зазоре 2 мм.

Аналогично из рисунка 15, а получим зависимость изменения коэффициента K от величины торцевого зазора X (в мм) при рациональном соотношении $d_{dg}/D_p = 0,65$.

Зависимость имеет вид:

$$K(X) = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot X^2 + 1,4 \cdot 10^{-3} X + 2,6 \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

Зависимость справедлива на участке изменения X от 2 до 7 мм при максимальном D_p до 0,4 и рациональном соотношении d_{dg}/D_p .

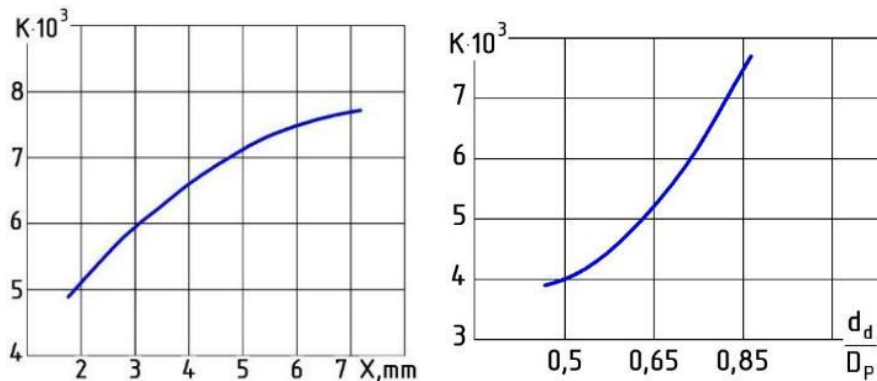


Рисунок 15. Зависимость коэффициента K от величины торцевого зазора X при $d_{dg}/D_p = 0,65$ (а) и от величины соотношения d_{dg}/D_p при торцевом зазоре, равном 2 мм (б)

Примечание – составлено авторами

Анализируя экспериментальные данные по влиянию перепускных перегородок на эффективность рабочего процесса пружинно-дисковой мельницы, можно сделать вывод: степень измельчения и производительность в большей степени определяются величиной торцевого зазора и диаметром проходного отверстия перепускных перегородок. Приближая или удаляя перепускную перегородку от пружинных дисков или меняя проходной диаметр, можно получить тонкий или крупный продукт измельчения, при этом не меняя скорости вращения, числа рабочих элементов и других параметров мельницы. Величина торцевого зазора определяет энергонапряженность мельницы – величину энергии, которую может подвести мельница к разрушаемому материалу, а следовательно, и конечную степень измельчения.

Проходной диаметр перепускной перегородки определяет скорость прохождения камеры измельчения, а следовательно, и время пребывания материала в мельнице. Учитывая это, можно измельчать материал на одном агрегате в несколько стадий с одинаковыми степенями измельчения, но в конечном итоге получить более высокую степень измельчения. Это ведет к более эффективному измельчению с экономией материальных и энергетических затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Экспериментально установлен характер движения материала и его распределение в помольной камере при работе мельницы. Основное влияние на характер распределения материала оказывают степень заполнения помольной камеры материалом и частота вращения пружинных дисков. При высокой частоте вращения весь материал вовлекается в круговое движение и под действием центробежных сил прижимается к стенкам помольной камеры, образуя условные тороподобные тела вокруг каждого пружинного диска. В зоне перекрытия пружинных дисков материал подвергается интенсивному измельчению. Устойчивость тел зависит от скорости вращения пружинных дисков и степени заполнения помольной камеры. Как показали эксперименты, упорядоченное движение материала приводит к повышению тонкости готового продукта.

2) Установлено влияние на интенсивность измельчения зазоров между подвижными и неподвижными элементами помольной камеры. Характер изменения тонкости измельчения от величины торцевого зазора описывается степенной зависимостью. Увеличение зазоров ведет к снижению степени измельчения и повышению транспортирующей способности мельницы. Необходимая тонкость готового продукта может быть достигнута за счет изменения величины торцевого зазора без изменения скорости вращения пружинных дисков и других параметров мельницы.

3) Существенное влияние на производительность мельницы оказывают перепускные перегородки, установленные между парами пружинных дисков, разделяющие мельницу на ступени измельчения, и размеры проходных отверстий в них. Эксперименты показали, что наилучших результатов по производительности и тонкости измельчения можно достичь при равенстве диаметров проходного отверстия перепускной перегородки и среднего диаметра пружинных дисков. Увеличение числа перепускных перегородок и уменьшение проходного диаметра приводят к снижению транспортирующей способности мельницы и увеличению времени пребывания материала в помольной камере. Применение перепускных перегородок позволяет разделить мельницу на отдельные ступени измельчения, что дает возможность настраивать их на измельчение все более мелкой фракции по мере продвижения материала с первой ступени на последнюю. При одинаковой степени измельчения в каждой ступени в целом мельница дает высокую степень измельчения. Устранение совместного измельчения крупных и мелких фракций ведет к снижению энергетических затрат.

4) Разработана методика определения основных конструктивных и режимных параметров мельницы исходя из заданной производительности и степени измельчения. Методика позволяет учитывать влияние торцевых зазоров и проходных отверстий перепускных перегородок на производительность мельницы.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Данная статья подготовлена в рамках проекта грантового финансирования научных исследований МНВО по теме AP23485224 «Разработка нового энергоэффективного оборудования по производству инновационных кормовых добавок для животноводства, с использованием промышленных отходов».

БЛАГОДАРНОСТИ: Авторы выражают благодарность коллегам за методологическую поддержку и полезные обсуждения, а также анонимным рецензентам за ценные замечания, способствовавшие улучшению качества статьи.

УВЕДОМЛЕНИЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА: Авторы заявляют, что при подготовке данной статьи технологии

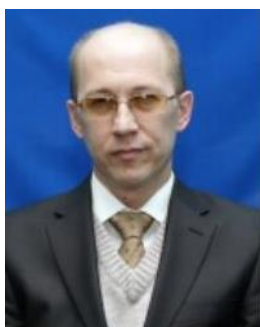
искусственного интеллекта не использовались.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Lee, J. (2007). Free vibration analysis of cylindrical helical springs by the pseudospectral method. *Journal of Sound and Vibration*, 302(1-2), 185-196.
- Sivachenko, L. A., Kurguzikov, A. M., Moiseenko, V. V., Bochkov, S. L., Golban, E. G., & Lescheva, M. V. (1990). Apparatus for grinding. United States Patent 4,899,941.
- Yildirim, V. (2012). On the linearized disturbance dynamic equations for buckling and free vibration of cylindrical helical coil springs under combined compression and torsion. *Meccanica*, 47(4), 1015-1033.
- Yu, A. M., & Hao, Y. (2012). Improved Riccati Transfer Matrix Method for Free Vibration of NonCylindrical Helical Springs Including Warping. *Shock and Vibration*, 19(6), 1167-1180.
- Yu, A. M., & Hao, Y. (2013). Effect of warping on natural frequencies of symmetrical cross-ply laminated composite non-cylindrical helical springs. *International Journal of Mechanical Sciences*, 74, 65-72.
- Бадиков, Р. Н., & Сорокин, Ф. Д. (2008). Сравнение экспериментального и расчетного значений величины критического крутящего момента изогнутой в полуокружность цилиндрической пружины. *Известия вузов. Машиностроение*, (1), 11-14. // Badikov, R. N., & Sorokin, F. D. (2008). Sravneniye eksperimentalnogo i raschetnogo znacheniy velichiny kriticheskogo krutyashchego momenta izognutoy v poluokruzhnost tsilindricheskoy pruzhiny [Comparison of experimental and calculated values of the critical torque of a cylindrical spring bent into a semicircle]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye*, (1), 11-14.
- Баловнев, В. И., Шмыков, И. Е., & Башкирцев, А. А. (1991). Планетарная мельница непрерывного действия. Патент SU 1653825, B02C 17/08. // Balovnev, V. I., Shmykov, I. E., & Bashkirtsev, A. A. (1991). Planetarnaya melnitsa nepreryvnogo deystviya [Planetary continuous mill]. Patent SU 1653825, V02S 17/08.
- Ганбат, Д., & Гаврюшин, С. С. (2007). Исследование статических и динамических характеристик винтовых пружинных мельниц. *Известия вузов. Машиностроение*, (8), 10-16. <https://izvuzmash.bmstu.ru/articles/685/685.pdf> // Ganbat, D., & Gavryushin, S. S. (2007). Issledovaniye staticheskikh i dinamicheskikh kharakteristik vintovykh pruzhinnykh melnits [Study of static and dynamic characteristics of helical spring mills]. *Izvestiya vuzov. Mashinostroyeniye*, (8), 10-16.
- Данилов, Р. Г. (1998). Определение основных параметров роторных мельниц с зубчатоподобным зацеплением [Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук]. М.: МАДИ. // Danilov, R. G. (1998). Opredeleniye osnovnykh parametrov rotornykh melnits s zubchatopodobnym zatsepleniyem [Determination of the main parameters of rotor mills with gear-like engagement] [Candidate dissertation]. Moscow: MADI.
- Иванников, В. В., Сорокин, Ф. Д., & Чжоу, С. (2018). Численное исследование динамики вращающейся изогнутой пружины с использованием конечного элемента в форме одного витка. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, (2), 11-21. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-2-11-22> // Ivannikov, V. V., Sorokin, F. D., & Zhou, S. (2018). Chislennoye issledovaniye dinamiki vrashchayushcheysya izognutoy pruzhiny s ispolzovaniyem konechnogo elementa v forme odnogo vitka [Numerical study of the dynamics of a rotating curved spring using a finite element in the form of a single coil]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye*, (2), 11-21.
- Севостьянов, В. С., Сиваченко, Т. Л., Ильина, Т. Н., Сиваченко, Л. А., Севостьянов, М. В., & Михайличенко, С. А. (2015). Игольчатый измельчитель материалов. Патент RU

- 151633, B02C 19/22. // Sevostyanov, V. S., Sivachenko, T. L., Ilyina, T. N., Sivachenko, L. A., Sevostyanov, M. V., & Mikhaylichenko, S. A. (2015). Iglchatyy izmelchitel materialov [Needle grinder for materials]. Patent RU 151633, B02C 19/22.
- Севостьянов, В. С., Сиваченко, Т. Л., Севостьянов, М. В., Горягин, П. Ю., & Бабуков, В. А. (2018). Научно-практические основы создания иглофрезерных измельчителей многоцелевого назначения. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, (3), 107-116. https://doi.org/10.12737/article_5abfc9cfb02a37.92961359 // Sevostyanov, V. S., Sivachenko, T. L., Sevostyanov, M. V., Goryagin, P. Yu., & Babukov, V. A. (2018). Nauchno-prakticheskiye osnovy sozdaniya iglofrezernykh izmelchiteley mnogotselovogo naznacheniya [Scientific and practical basis for the creation of multi-purpose needle-milling grinders]. Vestnik BGTU im. V.G.Shukhova, (3), 107-116.
- Сиваченко, Л. А., & Добровольский, Ю. К. (2012). История развития и современный уровень техники измельчения. Вестник Белорусско-Российского университета, (4 (37)), 69-76. <https://cyberleninka.ru/article/n/istoriya-razvitiya-i-sovremennyy-uroven-tehniki-izmelcheniya/viewer> // Sivachenko, L. A., & Dobrovolsky, Yu. K. (2012). Istoriya razvitiya i sovremennyy uroven tekhniki izmelcheniya [History of development and current state of grinding technology]. Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta, (4 (37)), 69-76.
- Сорокин, Ф. Д., & Чжоу, С. (2018). Конечный элемент в виде витка для расчета частот и форм собственных колебаний пружин с учетом сдвига и инерции вращения. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, (1), 3-11. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2018-1-3-11> // Sorokin, F. D., & Zhou, S. (2018). Konechnyy element vide vitka dlya rascheta chastot i form sobstvennykh kolebaniy pruzhin s uchetom sdviga i inertsii vrashcheniya [A finite element in the form of a coil for calculating the frequencies and modes of natural vibrations of springs, taking into account shear and rotational inertia]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye, (1), 3-11.
- Унаспеков, Б. А., Сиваченко, Л. А., Голбан, Е. Г. и др. (2015). Пружинная шаровая мельница. Патент РК №29820 МПК B02c 19/22. // Unaspekov, B. A., Sivachenko, L. A., Golban, E. G. et al. (2015). Pruzhinnaya sharovaya melnitsa [Spring ball mill]. Patent RK №29820 МПК V02s 19/22.

Информация об авторах
Авторлар туралы мәліметтер
Information about authors



Вавилов Андрей Владимирович – техника ғылымдарының кандидаты, «ИННОТЕХ ҰЕҰ» ЖШС, Өскемен қ., Қазақстан
Вавилов Андрей Владимирович – кандидат технических наук, ТОО «НПО ИННОТЕХ», г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан
Vavilov Andrey Vladimirovich – candidate of Technical Sciences, NPO INNOTECH LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan
e-mail: avavilov@ektu.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-0508>



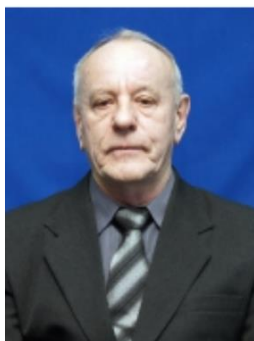
Яковлев Владимир Сергеевич – техника ғылымдарының магистрі, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Яковлев Владимир Сергеевич – магистр технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Yakovlev Vladimir Sergeevich – Master of Technical Sciences, D.Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: vjakovlev@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7315-4719>



Воробьев Александр Львович – биология ғылымдарының докторы, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Воробьев Александр Львович – доктор биологических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Vorobyov Alexander Lvovich – Doctor of Biological Sciences, D.Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: vorobyovalex@mail.ru



Ким Алина Игоревна – PhD докторы, «МИРАС» университеті, Шымкент қ., Қазақстан

Ким Алина Игоревна – доктор PhD, Университет «МИРАС», г.Шымкент, Казахстан

Kim Alina Igorevna – Doctor of PhD, MIRAS University, Shymkent, Kazakhstan

e-mail: kim_ali@miras.edu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9332-4279>



Гурьянов Георгий Александрович - техника ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен қ., Қазақстан

Гурьянов Георгий Александрович – кандидат технических наук, Восточно-Казахстанский технический университет им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан

Guryanov George Alexandrovich – candidate of Technical Sciences, D. Serikbayev East-Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

e-mail: gguryanov@ektu.kz

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3657-3735>