

4. Для підвищення енергетичної та технологічної ефективності процесу останньої стадії тонкого подрібнення в барабанному млині доцільно знижувати швидкість обертання та вміст частинок подрібнювального матеріалу в завантаженні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Новокраматорский машиностроительный завод. Мельницы: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.nkmz.com/fileadmin/data/prospekts/NKMZ_mills.pdf/.
2. Теория цемента / Под ред. А. А. Пашенко. – К.: Будівельник, 1991. – 168 с.
3. Кушка В. Н. Применение центробежно-ударных мельниц «МЦ» при помоле цемента / В. Н. Кушка, А. В. Артомонов, М. С. Гаркави, Е. А. Ашуркова, Е. Е. Бундина: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.uralomega.ru/helpcontent/ctmmsl/>.
4. Селективное разрушение минералов / В. И. Ревнивцев, Г. В. Гапонюк, Л. П. Завгородний и др.; Под ред. В. И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1988. – 286 с.
5. Шинкоренко С. Ф. Технология измельчения руд черных металлов / С. Ф. Шинкоренко. – М.: Недра, 1982. – 212 с.
6. Серго Е. Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / Е. Е. Серго. – М.: Недра, 1985. – 285 с.
7. Процессы помола и классификации в производстве цемента / В. С. Богданов, Н. П. Несмеянов, А. С. Ильин, Ю. М. Фадин. – М.: Изд-во АСВ; Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2004. – 199 с.
8. Ресурсозбереження та інтенсифікація процесів подрібнення / Г. Г. Півняк, В. І. Кириченко. – Д.: НГАУ, 2001. – 163 с.
9. Подрібнювання. Енергетика і технологія / Г. Г. Півняк, Л. А. Вайсберг, В. І. Кириченко, В. В. Кириченко. – Д.: НГУ, 2006. – 314 с.
10. Науменко Ю. В. Основи теорії робочих процесів барабанних млинів: Монографія / Ю. В. Науменко. – Рівне: НУВГП, 2014. – 336 с.
11. Пат. 58177U України, МПК В 02 С 17/00. Спосіб багатостадійного подрібнення в барабанному млині / Науменко Ю. В. – № u201009043; Заяв. 19.07.10; Опубл. 11.04.11, Бюл. № 7. – 8 с.

УДК 621.926.5:539.215:531.36

Дейнека К.Ю., Науменко Ю.В., Пухкий С.О.

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

ЭФЕКТИВНІСТЬ АВТОКОЛИВНИХ ПРОЦЕСІВ ПОДРІБНЕННЯ В БАРАБАННИХ МЛИНАХ

Тонке здрібнення вихідної сировини, завдяки пришвидшенню реакцій, визначає ефективність технологій та якість кінцевого продукту [1]. Такий процес є одним з найбільш енергоємних та дорогих при виробництві багатьох будівельних матеріалів. Традиційні барабанні млини із молотним завантаженням – кульові, трубні та лабораторні, завдяки низці переваг залишаються основним обладнанням подрібнення дисперсних матеріалів у різних галузях виробництва. При діаметрі камер 0,05-5 м вони забезпечують продуктивність у доволі широкому діапазоні від малих порцій порядку 10^{-4} до багатотоннажного виробництва у декілька сотень т/год. Разом з тим головним недоліком таких

млинів є низький механічний коефіцієнт корисної дії робочого процесу, внаслідок високих питомих витрат енергії – до 40-60 кВт·год./т. Це зумовлено порівняно низькою інтенсивністю циркуляції в камері обертального барабана молотного завантаження, оскільки значна його частина є пасивною і не приймає участі у подрібненні. Натомість процес помелу ударною дією, стиранням та роздавлюванням реалізується при невеликому падінні із подальшим зсуванням активної частини завантаження, частка якої складає лише 30-45%.

Новим технологічним напрямком радикального підвищення надзвичайно низької енергетичної ефективності барабан-

них млинів є активізація циркуляції завантаження шляхом створення коливних рухів у камері. Це може суттєво посилити інтенсивність взаємодії молольних тіл із частинками подрібнюваного матеріалу. Останнім часом збільшилось кількість технічних пропозицій щодо активізації циркуляції завантаження шляхом створення примусового пульсуючого режиму його руху при застосуванні різноманітних внутрішньокамерних енергообмінних пристроїв у вигляді виступаючих елементів [2-5]. Проте внаслідок низької надійності, спричиненої високою абразивністю завантаження, такі засоби не набули широкого виробничого застосування [6-8].

У той же час досить перспективним для практичного використання видається напрямок удосконалення процесів помелу на основі ефекту самозбудження пульсацій завантаження при нестійких режимах руху механічної системи млина, який базується на традиційних конструктивних рішеннях обладнання із барабаном без додаткових виступаючих елементів, що зазнають пришвидшеного зношування.

Було показано, що реальним циркуляційним режимом руху завантаження є трифазний [9]. На основі аналітичної механіки систем зі змінними інерційними параметрами [10], застосовуючи принципи твердіння [11,12] та встановлення ієрархії змінних [13], на підставі прямого методу Ляпунова [14,15] було одержано умову асимптотичної стійкості усталеного обертання барабанного млина. На основі механіки зернистих середовищ [16], розглядаючи інерційний режим руху завантаження [17], було визначено умову стійкості зсувного потоку завантаження камери обертового барабана. Згідно цих умов основними чинниками нестійкості, що викликають автоколивання, є варіації осьового моменту інерції завантаження та моменту опору обертанню барабана, а також підвищення дилатансії завантаження при деформуванні або розпорощення його в камері та демпфуючий вплив частинок подрібнюваного матеріалу на взаємодію молольних тіл.

Було розроблено алгоритм розрахунку раціональних конструктивних параметрів приводу барабанного млина із пружним

кутовим елементом, що сприяє підвищенню амплітуди автоколивань [18], а також спосіб керування процесом помелу шляхом змінювання швидкості обертання до досягнення максимальної амплітуди коливання пружного кутового елемента, а отже амплітуди автоколивань завантаження [19].

Однак явище підвищення ефективності подрібнення за рахунок зміни режимів руху внутрішньокамерного завантаження є ще недостатньо вивченим, а рекомендації щодо вибору раціональних технологічних та конструктивних параметрів барабанних млинів – неоднозначними.

Метою досліджень було експериментальне визначення технологічної ефективності застосування самозбудження автоколивань завантаження в робочих камерах барабанних млинів. Зокрема передбачалось встановити вплив ступеня заповнення камери та вмісту частинок подрібнюваного матеріалу у внутрішньокамерному завантаженні на зростання продуктивності та зниження питомої енергоємності робочого процесу.

Дослідження проводились на дослідному зразку лабораторного барабанного млина. Визначення гранулометричного складу вихідного матеріалу та готового продукту помелу проводилось шляхом просівання їх крізь сита та розрахунку вмісту фракцій.

Для проведення експериментів по помелу використовувався цементний клінкер ПАТ «Волинь-цемент», який був підготовлений шляхом попереднього дроблення і мав гранулометричний склад: від 0,08 до 0,16 мм – 17 %, від 0,16 до 0,315 мм – 25 %, від 0,315 до 0,63 мм – 30 % та від 0,63 до 1,25 мм – 28 %.

Було використано барабан із камерою без виступів радіусом $R=106$ мм та довжиною 100 мм. Як молольні тіла в лабораторному млині використовувались сталеві кульки діаметром $d=5,5$ мм. Шорсткість поверхні кульок відповідала технічним вимогам до молольних куль. Об'ємна частка куль у завантаженні становила приблизно 60 %, решта 40 % припадала на порожнини.

Продуктивність помелу оцінювалась за значеннями просіву через контрольне

сито № 008. Продуктивність у відносних одиницях, відсотках, визначалась за виразом $P=100-Z$, де Z – залишок на ситі № 008 (%). Енергетична ефективність процесу оцінювалась за питомою витратою енергії при отриманні цього просіву $E=N/P$, де N – потужність приводу обертання завантаженого барабана. Вважалось, що при $0,75 < \psi_{\omega} < 1,15$ потужність приводу практично не змінювалась.

Чисельне значення зміни продуктивності, при заміні традиційного режиму роботи млина на модернізований, оцінювалось співвідношенням P_M/P_T , де P_M та P_T – продуктивності помелу для модернізованого та традиційного режимів. Зміна питомої витрати енергії, при заміні режимів, оцінювалась співвідношенням $E_M/E_T = (N_M/P_M)/(N_T/P_T)$, де E_M та E_T – питомі витрати енергії для модернізованого та традиційного режимів, N_M та N_T – потужність приводу для модернізованого та традиційного режимів. Оскільки вважалось, що $N_M \approx N_T$, було прийнято $E_M/E_T \approx P_T/P_M$.

Досліджувалась ефективність запропонованого робочого процесу подрібнення в барабаних млинах із автоколивним рухом завантаження камери порівняно із традиційним робочим процесом без коливань. Досліди виконувались попарно для традиційного та запропонованого модернізованого режимів роботи млинів. Для зручності порівняння результатів змінювалось значення лише відносної швидкості обертання барабана $\psi_{\omega} = \omega/\omega_{кр}$, де ω – кутова швидкість барабана, $\omega_{кр} = \sqrt{g/R}$ – критична кутова швидкість, R – радіус камери, g – гравітаційне прискорення. Для традиційного режиму роботи приймалось $\psi_{\omega} = 0,75$. Для запропонованих режимів приймалось $\psi_{\omega} = 0,85-1,15$, що відповідало самозбудженню автоколивань завантаження із максимальною амплітудою.

Для серії досліджень ступінь заповнення камери завантаженням становила $\kappa = 0,25, 0,35$ та $0,45$. Ступінь заповнення внутрішньокамерного завантаження частинками подрібнюваного матеріалу κ_M становила $0,05, 0,225$ та $0,4$.

Тривалість процесу подрібнення становила 30 хв.

Результати досліджень наведено у табл. 1, де ψ_{ω} – відносна кутова швидкість барабана; κ – ступінь заповнення камери завантаженням; κ_M – ступінь заповнення завантаження частинками подрібнюваного матеріалу; Z – залишок на ситі $0,08$ мм (%); P – продуктивність помелу (%); P_M/P_T – відношення продуктивностей модернізованого та традиційного режимів роботи; E_M/E_T – відношення енергоємностей режимів роботи. Графічні результати зображено на рис. 1-8.

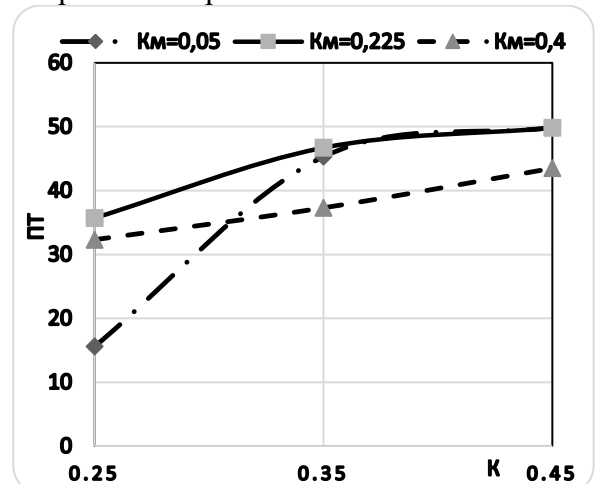


Рис. 1. Залежності продуктивності традиційного режиму роботи P_T (%) від ступеня заповнення камери завантаженням κ при значенні ступеня заповнення завантаження подрібнюваним матеріалом $\kappa_M = 0,05, 0,225$ та $0,4$.

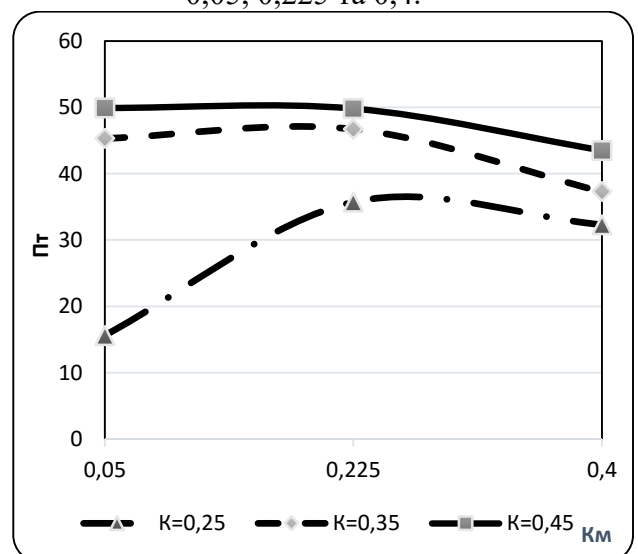


Рис. 2. Залежності P_T (%) від κ_M при $\kappa = 0,25, 0,35$ та $0,45$.

Таблиця 1 - Результати експериментальних досліджень

№ з/п	Режим роботи	ψ_{ω}	κ	κ_m	$З$ %	$П$ %	$\frac{P_M}{P_T}$	$\frac{E_M}{E_T}$
1	традиційний	0,75	0,25	0,05	84,4	15,6	2,4	0,417
2	модернізований	0,85-1,15	0,25	0,05	62,6	37,4		
3	традиційний	0,75	0,25	0,225	64,3	35,7	1,38	0,723
4	модернізований	0,85-1,15	0,25	0,225	50,6	49,4		
5	традиційний	0,75	0,25	0,4	67,7	32,3	1,46	0,684
6	модернізований	0,85-1,15	0,25	0,4	52,8	47,2		
7	традиційний	0,75	0,35	0,05	54,7	45,3	1,48	0,675
8	модернізований	0,85-1,15	0,35	0,05	32,9	67,1		
9	традиційний	0,75	0,35	0,225	53,3	46,7	1,27	0,789
10	модернізований	0,85-1,15	0,35	0,225	40,8	59,2		
11	традиційний	0,75	0,35	0,4	62,7	37,3	1,3	0,769
12	модернізований	0,85-1,15	0,35	0,4	51,5	48,5		
13	традиційний	0,75	0,45	0,05	50,1	49,9	1,47	0,681
14	модернізований	0,85-1,15	0,45	0,05	26,7	73,3		
15	традиційний	0,75	0,45	0,225	50,2	49,8	1,16	0,859
16	модернізований	0,85-1,15	0,45	0,225	42,05	57,95		
17	традиційний	0,75	0,45	0,4	56,5	43,5	1,07	0,938
18	модернізований	0,85-1,15	0,45	0,4	53,6	46,4		

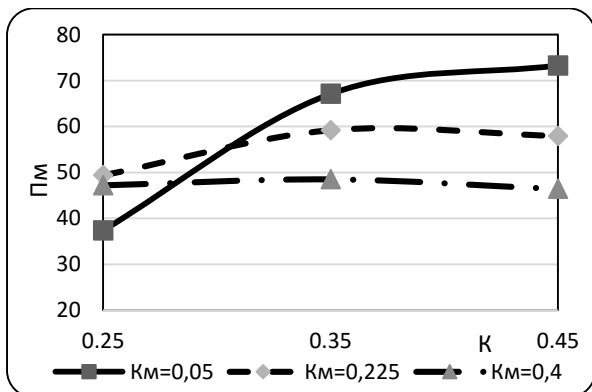


Рис. 3. Залежності продуктивності модернізованого режиму роботи P_M (%) від κ при $\kappa_m=0,05, 0,225$ та $0,4$.

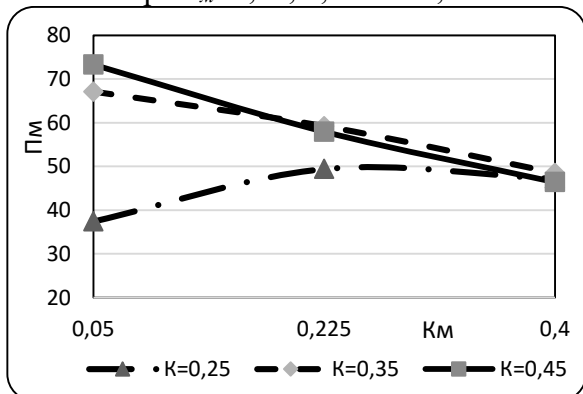


Рис. 4. Залежності P_M (%) від κ_m при $\kappa=0,25, 0,35$ та $0,45$.

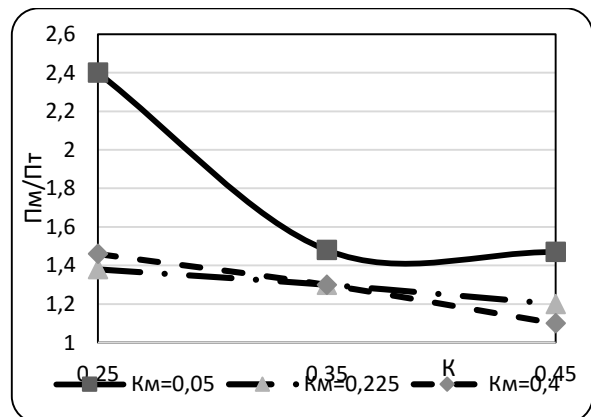


Рис. 5. Залежності відношення продуктивностей модернізованого та традиційного режимів роботи P_M/P_T від κ при $\kappa_m=0,05, 0,225$ та $0,4$.

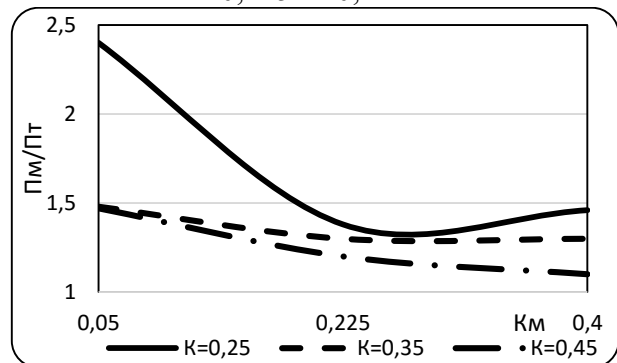


Рис. 6. Залежності P_M/P_T від κ_m при $\kappa=0,25, 0,35$ та $0,45$.

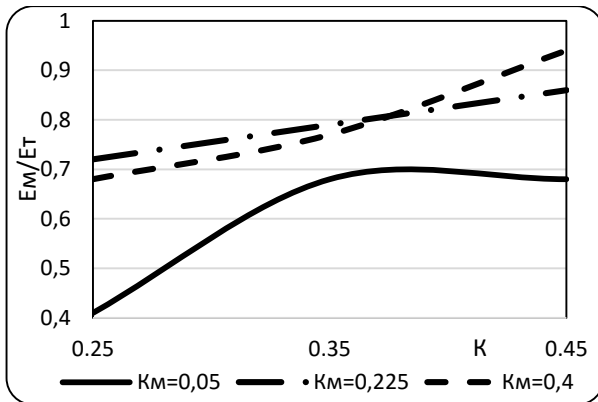


Рис. 7. Залежності відношення відносних питомих витрат енергії модернізованого та традиційного режимів роботи E_M/E_T від κ при $\kappa_M=0,05, 0,225$ та $0,4$.

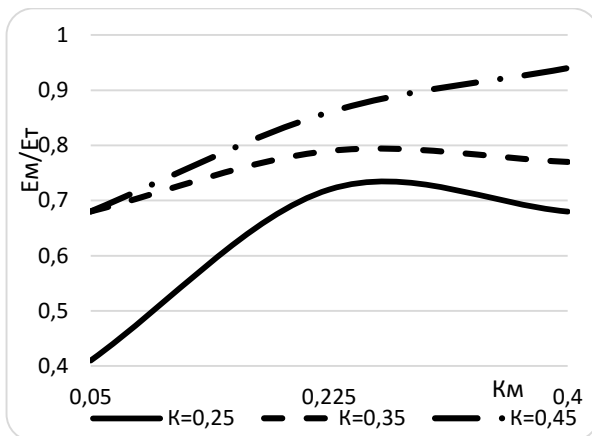


Рис. 8. Залежності E_M/E_T від κ_M при $\kappa=0,25, 0,35$ та $0,45$.

Аналіз отриманих залежностей засвідчив таке:

Із рис. 1. впливає, що продуктивність традиційного способу роботи млина P_T , зі збільшенням ступеня заповнення камери завантаженням κ , зростає від 15,6 % до 49,9 %.

Рис. 2. показує, що, продуктивність традиційного способу роботи млина P_T , зі збільшенням ступеня заповнення завантаженням подрібнюваним матеріалом κ_M , при значенні ступеня заповнення камери завантаженням $\kappa=0,35$ і $0,45$ спадає від 49,9 % до 37,3 %, а при значенні $\kappa=0,25$ зростає від 15,6 % до 35,7 %.

Із рис. 3. впливає, що продуктивність модернізованого способу роботи млина P_M , зі збільшенням ступеня заповнення камери завантаженням κ , переважно зростає від 37,4 % до 73,3 %.

Рис. 4. показує, що продуктивність модернізованого способу роботи млина P_M , зі збільшенням ступеня заповнення завантаженням матеріалом κ_M , при значенні ступеня заповнення камери завантаженням $\kappa=0,35$ і $0,45$ спадає від 73,3 % до 46,4 %, а при значенні $\kappa=0,25$ зростає від 37,4 % до 49,4 %.

Із рис. 5. впливає, що відношення продуктивності модернізованого способу роботи млина до продуктивності традиційного способу P_M/P_T , зі зменшенням ступеня заповнення камери завантаженням κ , зростає від 1,07 до 2,4.

Рис. 6. показує, що відношення продуктивності модернізованого способу роботи млина до продуктивності традиційного способу P_M/P_T , зі зменшенням ступеня заповнення завантаженням матеріалом κ_M , зростає від 1,07 до 2,4.

Із рис. 7. впливає, що відношення питомої витрати енергії модернізованого способу роботи млина до питомої витрати традиційного E_M/E_T , зі зменшенням ступеня заповнення камери завантаженням κ , спадає від 0,938 до 0,417.

Рис. 8. показує, що відношення питомої витрати енергії модернізованого способу роботи млина до питомої витрати традиційного E_M/E_T , зі зменшенням ступеня заповнення завантаженням матеріалом κ_M , спадає від 0,938 до 0,417.

Виявилось, що застосування запропонованого режиму роботи млина із автоколиваннями завантаження, порівняно із традиційним процесом помелу, значно підвищує продуктивність та знижує питомі витрати енергії.

Висновки: 1. Встановлено ефект суттєвого підвищення продуктивності та зниження енергоємності автоколивного процесу подрібнення в барабанному млині при зниженні ступеня заповнення камери завантаженням та вмісту подрібнюваного матеріалу у завантаженні.

2. Виявилось, що при використанні запропонованого автоколивного процесу подрібнення в барабанному млині, порівняно із традиційним процесом помелу, продуктивність підвищується на 7-140 %, а питома енергоємність знижується на 6-58 %. При цьому, зі зменшенням ступеня

заповнення камери завантаженням та зменшенням вмісту частинок подрібнюваного матеріалу у завантаженні, ефективність нового процесу по продуктивності та енергоємності зростає.

3. Для підвищення енергетичної та технологічної ефективності автоколивного процесу подрібнення в барабанному млині доцільно знижувати ступінь заповнення камери завантаженням та вміст частинок подрібнювального матеріалу в завантаженні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ходаков Г. С. Физика измельчения / Г. С. Ходаков. – М.: Наука, 1972. – 308 с.
2. А. с. 1074594А СССР, МПК В 02 С 17/22. Футеровка барабанной мельницы / Иванов А. Н., Кисель А. Г., Боровик А. А. – № 3242276/29-33; заяв. 28.01.81; опубл. 23.02.84, Бюл. № 7. – 8 с.
3. Зеленков С. Ф. Шаровая мельница с энергообменными футеровочными элементами: дис... канд. техн. наук: 05.02.13 / Зеленков Сергей Федорович. – Белгород, 1998. – 181 с.
4. Богданов В. С. Шаровые барабанные мельницы (с поперечно-продольным движением загрузки) / В. С. Богданов. – Белгород: Изд-во БелГТАСМ, 2002. – 258 с.
5. Матієга В. М. Інтенсифікація процесу подрібнення в трубних млинах з активаційними броньфутераціями: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.08 «Процеси та обладнання хімічної технології» / В. М. Матієга. – К.: 2002. – 17 с.
6. Крюков Д. К. Усовершенствование размольного оборудования горнообогатительных предприятий / Д. К. Крюков. – М.: Недра, 1966. – 174 с.
7. Хватов Ю. А. Влияние профиля футеровочных плит шаровых мельниц на их износостойкость и производительность мельниц / Ю. А. Хватов, Г. А. Морозов, А. А. Шильман // Изв. вузов. Горн. журн. – 1969. – № 11. – С. 86-90.
8. Данилов Л. Е. Промышленные испытания унифицированной футеровки шаровых мельниц / Л. Е. Данилов, Г. Э. Корешков, В. Н. Лю, Н. С. Иванов, И. Ф. Дун // Обогащение руд. – 1973. – № 4(106). – С. 17-19.
9. Науменко Ю. В. Теоретичні основи робочих процесів машин барабанного типу: Монографія / Ю. В. Науменко, К. Ю. Дейнека. – Рівне: НУВГП, 2014. – 531 с.
10. Новоселов В. С. Аналитическая механика систем с переменными массами / В. С. Новоселов. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. – 240с.
11. Бессонов А. П. Основы динамики механизмов с переменной массой звеньев / А. П. Бессонов. – М.: Наука, 1967. – 279 с.
12. Бессонов А. П. Динамика механизмов // Кинематика, динамика и точность механизмов / А. П. Бессонов // Справочник / Под ред. Г. В. Крейнина. – М.: Машиностроение, 1984. – С. 75-110.
13. Блехман И. И. Механика и прикладная математика. Логика и особенности приложения математики / И. И. Блехман, А. Д. Мышкис, Я. Г. Пановко. – М.: Наука, 1990. – 360 с.
14. Василенко М. В. Теорія коливань і стійкості руху / М. В. Василенко, О. М. Алексейчук. – К.: Вища шк., 2004. – 525 с.
15. Андронов А. А. Теория колебаний / А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. – М.: Наука, 1981. – 568 с.
16. Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений: Сб. ст. Пер. с англ. / Сост. И. В. Ширко. – М.: Мир, 1985. – 280 с.
17. Долгунин В. Н. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение / В. Н. Долгунин, В. Я. Борщев. – М.: Изд-во Машиностроение-1, 2005. – 112 с.
18. Пат. 58175U України, МПК В 02 С 17/24. Привод барабанного млина із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням / Дейнека К. Ю. – № u201009020; заяв. 18.07.10; опубл. 11.04.11, Бюл. № 7. – 12с.
19. Пат. 57104U України, МПК В 02 С 25/00. Спосіб керування процесом подрібнення в барабанному млині із автоколивним внутрішньокамерним завантаженням / Дейнека К. Ю. – № u201009048; заяв. 19.07.10; опубл. 10.02.11, Бюл. № 3. – 6 с.