

Влияние степени загрузки шаровой барабанной мельницы мелющими шарами на интенсивность размола угля

^{1*}**КАМАРОВА Сауле Нуртазаевна**, магистр, старший преподаватель, cfekt.rfvfhjdf@mail.ru,

¹**ОНИЩЕНКО Ольга Николаевна**, магистр, старший преподаватель, teacherolg@mail.ru,

²**АБИЛЬДИНОВА Сауле Кианбековна**, PhD, доцент, sauie18kz@mail.ru,

³**ИСАЕВ Валерий Львович**, к.т.н., доцент, isaevvalerie@gmail.com,

⁴**ТЕРЗИЕВ Ангел Костадинов**, PhD, доцент, aterziev@tu-sofia.bg,

¹НАО «Карагандинский индустриальный университет», пр. Республики, 30, Темиртау, Казахстан,

²НАО «Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева», ул. А. Байтурсынова, 126/1, Алматы, Казахстан,

³НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

⁴Технический университет Софии, бульвар Климента Охридского, 8, София, Болгария,

*автор-корреспондент.

Аннотация. Существует прямая зависимость между степенью загрузки шаровой барабанной мельницы мелющими шарами и интенсивностью размола угля. При увеличении степени загрузки шаровой мельницы интенсивность размола угля также увеличивается. Это связано с тем, что при увеличении количества мелющих шаров внутри мельницы уголь подвергается более интенсивному воздействию сил трения и ударов, что приводит к более эффективному размолу материала. Однако следует учитывать, что при слишком большой степени загрузки мельницы может возникнуть проблема с недостаточной циркуляцией материала, что может привести к снижению эффективности мельницы. Таким образом, оптимальная степень загрузки шаровой барабанной мельницы мелющими шарами должна быть выбрана в зависимости от характеристик материала и условий работы мельницы для достижения максимальной эффективности размола угля.

Ключевые слова: шаробарабанная мельница, степень загрузки, интенсивность размола, мелющие шары, энергетическая эффективность.

Введение

Шаровые барабанные мельницы обладают высокой производительностью и способны перерабатывать большие объемы угля. Они широко применяются в энергетических станциях, где требуется непрерывное и эффективное производство электроэнергии [1].

Энергетическая эффективность измельчения угля в шаровой барабанной мельнице зависит от интенсивности процесса измельчения, которая в свою очередь зависит от ряда факторов, таких как размер и форма шаров, скорость вращения мельницы, высота падения шаров, размер и форма измельчаемого материала, физико-механические свойства материала, наличие абразивных включений в материале и режим работы

мельницы.

В шаровой мельнице процесс измельчения угля происходит благодаря удару стальных шаров, которые вращаются внутри цилиндра мельницы и падают на уголь с определенной высоты. При ударе шары переносят свою энергию на уголь, вызывая его разрушение и измельчение. Истирание между шарами также может способствовать измельчению угля, но в гораздо меньшей степени, чем удары. Кроме того, уголь может быть измельчен также и за счет трения о поверхность мельницы, но это зависит от конструкции и режима работы мельницы.

Чем более интенсивным является процесс измельчения, тем больше энергии требуется для его осуществления. Однако, если правильно выбрать параметры мельницы и

процесса измельчения, то можно достичь оптимального баланса между интенсивностью процесса измельчения и энергетической эффективностью. Например, использование оптимального размера и формы шаров, установка оптимальной скорости вращения мельницы и регулировка высоты падения шаров может позволить достичь высокой интенсивности процесса измельчения при снижении энергозатрат на измельчение [2].

Поэтому при проектировании и эксплуатации шаровых барабанных мельниц важно учитывать все перечисленные факторы и стремиться к оптимизации процесса измельчения с целью повышения энергетической эффективности и снижения затрат на производство.

Шаровые барабанные мельницы также используются в других отраслях, где требуется помол твердых материалов, например, в цементной промышленности или в производстве минеральных порошков.

Теория вопроса

На производительность барабанных мельниц, кроме частоты вращения, радиуса и коэффициента заполнения барабана, большое значение имеет размер мелющих шаров. Размер мелющих шаров зависит от крупности исходных частиц и конечного продукта. Эффективность процесса измельчения определяется высотой падения шаров в барабане $h_{\text{пш}}$. Чем выше высота падения шаров, тем выше эффект измельчения, т.е. тем больше производительность мельницы V_m , но одновременно в несколько большей степени возрастает затрата мощности N_m и удельный расход электроэнергии на размол $\mathcal{E}_m$, равный отношению мощности N_m к производительности V_m [3].

Определить влияние значений характеристик мелющих шаров на интенсивность размолла угля можно с помощью компьютерного моделирования. Для этого необходимо создать компьютерную модель шаровой барабанной мельницы, которая будет учитывать геометрические параметры мельницы, свойства угля и характеристики мелющих шаров. Задать значения характеристик мелющих шаров, таких как размер, материал и плотность, и запустить моделирование для определения интенсивности размолла угля при этих значениях.

Провести серию моделирований, в которых будут изменяться значения характеристик мелющих шаров, и сравнить результаты, чтобы определить, какие значения характеристик оказывают наибольшее влияние.

С помощью компьютерного моделирования в программе Altair «EDEM» создана модель шаровой барабанной мельницы. По-

зволяющая выполнить сложный анализ на базе метода дискретных элементов [4, 5], в частности комбинировать механические, вещественные и другие физические свойства модели мельницы и измельчаемого угля. EDEM позволяет виртуально воссоздать процессы внутри мельницы, учитывая взаимодействие между частицами угля и шарами. EDEM позволяет анализировать различные параметры процесса помола, такие как распределение размеров частиц. На рисунке 1 представлена панель программы «EDEM» и движение мелющих тел в камере шаровой барабанной мельницы. Нами выбрана длина барабана $L = 0,390$ м, диаметр $D = 0,25$ м при этом объем барабана равен $V_6 = 0,019$ м³.

Создание модели шаровой барабанной мельницы должно связывать следующие параметры: размеры барабана (отношение $L/D = 1,56$), шаровая загрузка барабана, скорость вращения барабана, время размола топлива, свойства угля и коэффициент полезного действия [6] процесса.

Число оборотов мельницы определяется главным образом диаметром барабана. При замедленном числе оборотов мельницы угол подъема шаров невысок. На больших скоростях вращения мельницы возникают центробежные силы, которые превышают силы тяжести шаров. При критическом числе оборотов центробежная сила, действующая на шары, будет равна их весу, и шары, прижатые центробежной силой к стенке барабана, будут вращаться вместе с барабаном. Минимальная окружная скорость на внутренней поверхности, при которой происходит критическое число оборотов $n_{\text{кр}}$ шаровой барабанной мельницы, определяется по формуле [7]:

$$n_{\text{кр}} = \frac{42,4}{\sqrt{D}}, \text{ об/мин}, \quad (1)$$

где D – диаметр шаровой барабанной мельницы, мм.

Рабочее число оборотов шаровой барабанной мельницы составляет около 75% от критического числа оборотов:

$$n = \frac{32}{\sqrt{D}}, \text{ об/мин}, \quad (2)$$

где D – диаметр шаровой барабанной мельницы, мм.

Критическое и рабочее число оборотов для модели ШБМ составляют: $n_{\text{кр}} = 85$ об/мин; рабочее число оборотов $n_p = 64$ об/мин.

Заполнение барабана мелющими шарами также влияет на производительность мельницы и эффективность размолла. Степень заполнения барабана шарами определяется по методике [8]:

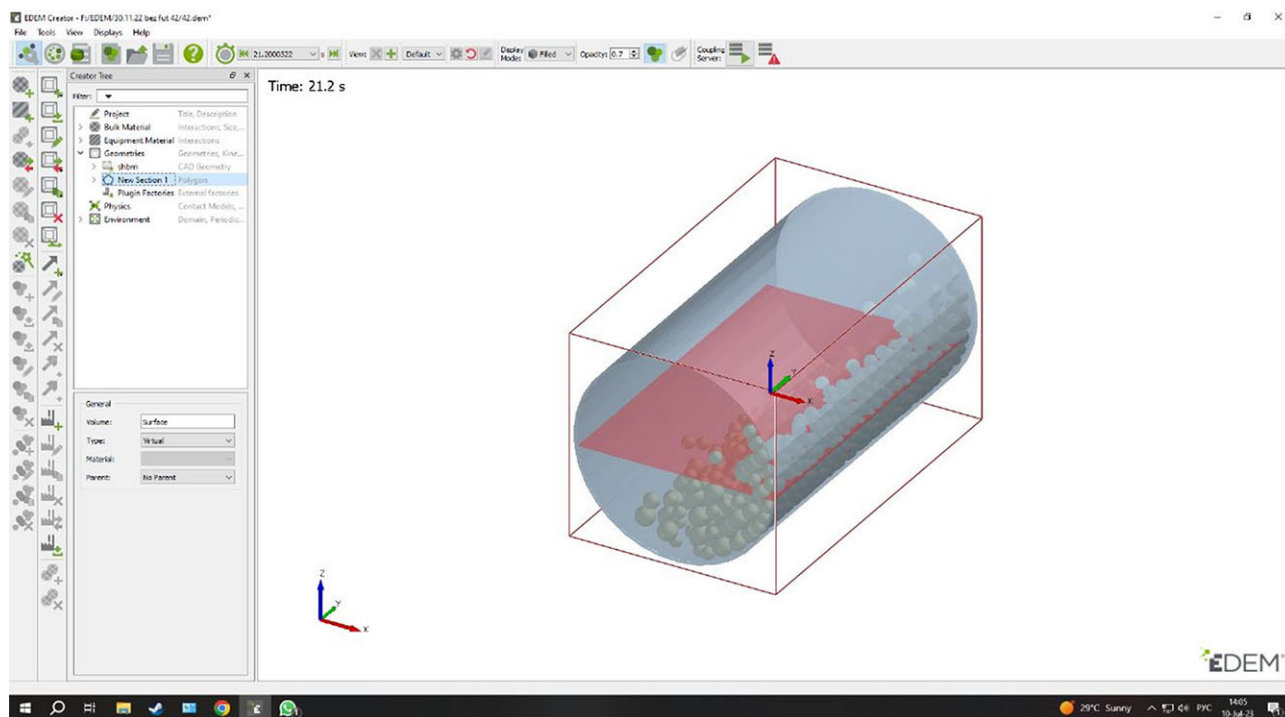


Рисунок 1 – Панель программы «EDEM» и движение мелющих тел в камере шаровой барабанной мельницы

$$\phi_6 = \frac{G_{\text{ш}}}{\gamma_{\text{ш.нас}} V_6}, \quad (3)$$

где $G_{\text{ш}}$ – шаровая загрузка мельницы, определяемая из комплектности мельницы металлическими шарами различных диаметров, кг;

$\gamma_{\text{ш.нас}}$ – насыпной удельный вес шаров, кг/м³;

V_6 – внутренний объем барабана, м³.

Из расчета получены коэффициенты заполнения мельницы шарами $\phi_6 = 0,45; 0,40; 0,35; 0,30; 0,25; 0,2 \%$.

В программе EDEM произведены снимки серии загрузки шаровой барабанной мельницы (ШБМ) мелющими шарами и определено перемещение мелющих шаров. Внутри барабана на рисунке 2 (а, б, в, г, д, е) наглядно представлены стоп-кадры моделирования EDEM, где мелющие шары окрашены по их кинетической скорости при различных степенях загрузки шарами (стоп-кадр).

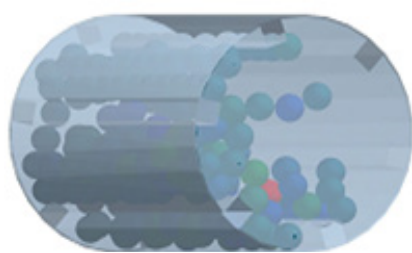
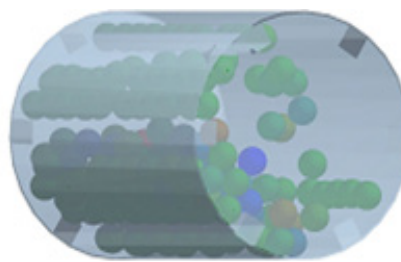
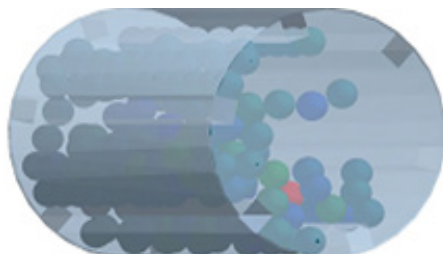
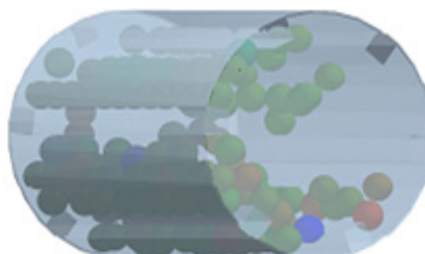
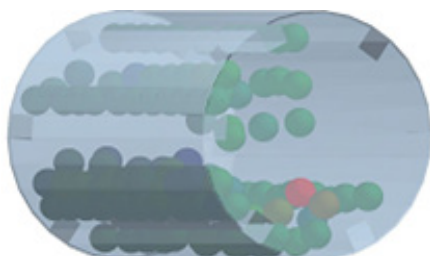
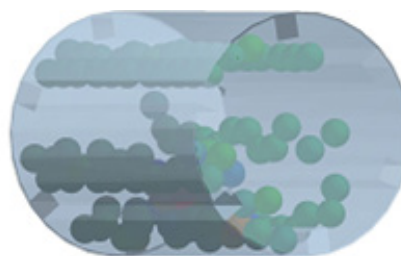
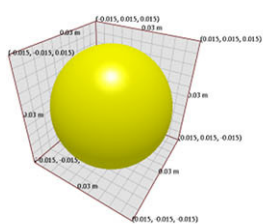
Моделирование позволяет исследовать движение загрузки в мельницах разных конструкций камеры, при любых значениях степени заполнения барабана, частоты его вращения и при любом составе мелющих тел. Это дает возможность при испытаниях новых конструкций и оптимизации работы эксплуатируемых машин заменить значительную часть трудоемких технологических исследований вычислительными экспери-

ментами. Использование программного пакета EDEM и метода дискретных элементов позволяет, «заглянув в мельницу», увидеть то, что недоступно.

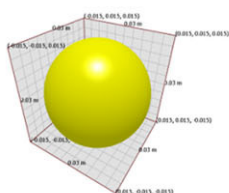
При создании модели процесса измельчения в мельнице были заданы диаметры мелющих тел (рисунок 3) – $\varnothing 40$ мм, $\varnothing 30$ мм, $\varnothing 25$ мм, $\varnothing 20$ мм. Эти опыты в определенной степени позволяют оценить влияние диаметра шара на измельчение углей. Как было показано при обсуждении подходов по моделированию мельниц этого типа, уменьшение диаметра шаров по мере их истирания несколько снижает интенсивность измельчения. Однако в используемых мельницах шары сохраняются в пространстве барабана вплоть до полной потери размера. Это означает, что происходят затраты энергии на вращение барабана с этими «плохо» работающими шарами. Своевременное удаление шаров с недопустимо уменьшенными диаметрами может снизить затраты энергии на размол угля примерно на 5%. Однако разработка техники удаления этих шаров выходит за пределы диссертационного исследования.

При проведении серии экспериментов и варьировании степени загрузки мелющими шарами количество мелющих шаров было определено согласно таблице.

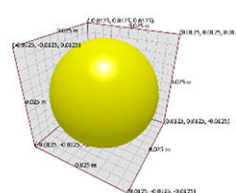
Заполнение барабана мелющими шарами влияет на производительность и эффек-

а) Стоп-кадр при $\phi_6=0,45\%$ б) Стоп-кадр, при $\phi_6=0,40\%$ в) Стоп-кадр, при $\phi_6=0,35\%$ г) Стоп-кадр, при $\phi_6=0,30\%$ д) Стоп-кадр, при $\phi_6=0,25\%$ е) Стоп-кадр, при $\phi_6=0,20\%$ **Рисунок 2 – Стоп-кадры моделирования EDEM**

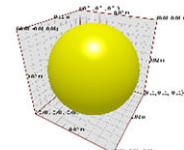
Ø 40 мм



Ø 30 мм



Ø 25 мм



Ø 20 мм

Рисунок 3 – Диаметры мелющих шаров (трехмерная модель)

тивность размола. При степени заполнения объема барабана более 0,40% в средней части барабана происходит столкновение поднимающихся шаров с падающими, что ухудшает эффективность измельчения. При $\phi_6=20-30\%$ заполнении шаровой мельницы мелющими шарами часть шаров отбрасывается от стенки при высоких скоростях, при критических скоростях происходит их скольжение. При $\phi_6=30-40\%$ заполнения

мелющими шарами скольжение ослабевает, внешние шары прилипают к стенке при критических скоростях [9].

Для получения оптимальной загрузки для шаровой барабанной мельницы необходимо подобрать такую загрузку, при которой увеличится удельная поверхность, уменьшится пористость шаровой загрузки, а также получить максимальное распределение материала в камере в зависимости от времени [10].

Расчетные параметры мелющих шаров различных диаметров

Диаметр шара, мм	Количество шаров при различных коэффициентах заполнения мельницы					
	$\phi_6 = 0,45$	$\phi_6 = 0,40$	$\phi_6 = 0,35$	$\phi_6 = 0,30$	$\phi_6 = 0,25$	$\phi_6 = 0,20$
dш 20 мм	700	590	500	450	380	300
dш 25 мм	350	300	260	240	220	180
dш 30 мм	190	180	170	150	130	120
dш 40 мм	130	120	105	95	80	70

Выводы

В данной статье рассмотрено влияние параметров шаровой барабанной мельницы на интенсивность размола угля. Использование современных программных продуктов для моделирования процесса измельчения позволит предсказать изменение параметров работы и внести коррективы в режиме реального времени. Для определения влияния значений характеристик мелющих шаров с помощью компьютерного моделирования использовалась математическая модель шаровой барабанной мельницы с программным обеспечением «EDEM». Для получения оптимальной загрузки для шаровой барабанной мельницы проведены серии экспериментов и варьирования степени загрузки мелющими шарами различных диаметров. Выбор диаметра и количества шаров является важным фактором. Методы подбора шаровой

загрузки для мельницы, учет структуры потока материала и времени его пребывания в камере, можно получать в одних случаях режим перекачивания, а в других режим скольжения, причем в зависимости от устанавливаемого режима эффективность размола будет различной.

В зависимости от скорости мелющего шара в промежутке времени представлен график зависимости средней скорости мелющего тела.

Анализируя эксперименты, выполненные в EDEM, установлено, что оптимальная степень шаровой загрузки ϕ_6 для исследования процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице (ШБМ) является в промежутке $\phi_6 = 0,30-0,35\%$. Так как при такой загрузке мельницы шарами скорость мелющих шаров вполне достаточна для получения угольной пыли нужной фракции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шувалов С.И., Новосельцева С.С., Веренин А.А., Ворошилов О.А. Математическая модель пылестемы с шаровой барабанной мельницей для анализа схем классификации // Вестник ИГЭУ. Вып. 5. 2017. С.10-18.
2. Zheng Yu., Кузнецова М.М., Ведь В.Е., Алексина А.А. Экспериментальные исследования энергоэффективного режима измельчения твердых материалов // Журнал технической физики. 2016. Том 86. Вып. 5.
3. Байгереев С.Р. Обоснование параметров и создание конструкции роторно-вибрационного измельчителя с разработкой технологии изготовления. Дис. ... док. фил. (PhD). – Усть-Каменогорск, 2019. – 90 с.
4. Обзор программных продуктов для симуляции движения мелющей загрузки в мельницах. <https://scicenter.online/agregaty-i-protsessyi-scicenter/obzor-programmnyih-produktov-dlya-simulyatsii-173863.html>
5. Изучение процесса измельчения на примере шаровой мельницы <http://www.gaps.tstu.ru/win-1251/lab/magistr/shar/win-1251/shm3.html>
6. Kuznetsova M.M. Vplyv sposobu podribnenea na virtati protsesu / M.M. Kuznetsova, B.E. Vedi // Integrirovani tehnologhii ta energosberejennea / schokvartalinyi naukovo-praktichnii jurnal. – Kharkiv: NTU «ХПИ», 2013. – Nr. 2. – Pp. 18-22. (in Ukrainian).
7. Гаврунов А. Ю. Вибровращательная мельница с продольно-поперечным движением мелющих тел: Дис. ... кандидата технических наук: 05.02.13 / Гаврунов Алексей Юрьевич. Место защиты: Белго-

- родский государственный технологический университет им.В.Г.Шухова, – Белгород, 2014. – 167 с.
8. Бирюков А.Б. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо: учебное пособие / А.Б. Бирюков, И.П. Дробышевская, Ю.Е. Рубан. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2014. – 232 с.
 9. Аксенов А.А. FlowVision: индустриальная вычислительная гидродинамика / А.А. Аксенов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2017. – Т. 9. – № 1. – С. 5-20.
 10. Хахалев П.А. Совершенствование конструкции ступенчатой футеровки и исследование процесса измельчения в шаровой барабанной мельнице / БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – 177 с.
 11. Турлубек А. Текущая ситуация и проблемы в эксплуатации энергетического оборудования // Энергетика. – 2013. – № 3 (46). – С. 8-12.

Шарлы барабан диірменінің ұнтақтау шарларымен жүктелу дәрежесінің көмірді ұнтақтау қарқындылығына әсері

¹***КАМАРОВА Сауле Нуртазаевна**, магистр, аға оқытушы, cfekt.rfvfjhjdf@mail.ru,

¹**ОНИЩЕНКО Ольга Николаевна**, магистр, аға оқытушы, teacherolg@mail.ru,

²**АБИЛЬДИНОВА Сауле Кианбековна**, PhD, доцент, sauie18kz@mail.ru,

³**ИСАЕВ Валерий Львович**, т.ғ.к., доцент, isaevvalerie@gmail.com,

⁴**ТЕРЗИЕВ Ангел Костадинов**, PhD, доцент, aterziev@tu-sofia.bg,

¹«Қарағанды индустриялық университеті» КеАҚ, Республика даңғылы, 30, Теміртау, Қазақстан,

²«Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті» КеАҚ, А. Байтұрсынұлы көшесі, 126/1, Алматы, Қазақстан, Инженериядағы Менеджмент және кәсіпкерлік кафедрасы

³«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,

⁴София техникалық университеті, Климент Охридский бульвары, 8, София, Болгария,

*автор-корреспондент.

Аңдатпа. Шарлы барабан диірменінің ұнтақтау шарларымен жүктелу дәрежесі мен көмірді ұнтақтау қарқындылығы арасында тікелей байланыс бар. Шар диірменінің жүктеме дәрежесі жоғарылаған сайын көмірді ұнтақтау қарқындылығы да артады. Себебі, диірмен ішіндегі тегістеу шарларының саны артқан сайын, көмір үйкеліс күштері мен соққылардың күшеюіне ұшырайды, бұл материалдың тиімді ұнтақталуына әкеледі. Алайда, диірменнің тым көп жүктелуімен материалдың жеткіліксіз айналымы проблемасы туындауы мүмкін, бұл диірменнің тиімділігінің төмендеуіне әкелуі мүмкін. Осылайша, шар барабан диірменінің тегістеу шарларымен тиелуінің оңтайлы дәрежесі көмірді ұнтақтаудың максималды тиімділігіне қол жеткізу үшін материалдың сипаттамаларына және диірменнің жұмыс жағдайына байланысты таңдалуы керек.

Кілт сөздер: барабан диірмені, жүктеу дәрежесі, ұнтақтау қарқындылығы, ұнтақтау шарлары, энергия тиімділігі.

Influence of the Degree of Loading of a Ball Drum Mill with Grinding Balls on the Intensity of Coal Grinding

¹***KAMAROVA Saule**, Master's Degree, Senior Lecturer, cfekt.rfvfjhjdf@mail.ru,

¹**ONISHCHENKO Olga**, Master's Degree, Senior Lecturer, teacherolg@mail.ru,

²**ABILDINOVA Saule**, PhD, Associate Professor, sauie18kz@mail.ru,

³**ISAEV Valery**, Cand. of Tech. Sci., Associate Professor, isaevvalerie@gmail.com,

⁴**TERZIEV Angel**, PhD, Associate Professor, aterziev@tu-sofia.bg,

¹NPJSC «Karaganda Industrial University», Republic Avenue, 30, Temirtau, Kazakhstan,

²NPJSC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after Gumarbek Daukeyev», A. Baitursynova Street, 126/1, Almaty, Kazakhstan,

³NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

⁴Technical University of Sofia, Kliment Ohridski Boulevard, 8, Sofia, Bulgaria,

*corresponding author.

Abstract. *There is a direct relationship between the degree of loading of a ball drum mill with grinding balls and the intensity of coal grinding. With an increase in the degree of loading of the ball mill, the intensity of coal grinding also increases. This is due to the fact that with an increase in the number of grinding balls inside the mill, coal is exposed to more intense friction forces and impacts, which leads to more efficient grinding of the material. However, it should be borne in mind that if the mill is loaded too much, there may be a problem with insufficient circulation of the material, which can lead to a decrease in the efficiency of the mill. Thus, the optimal degree of loading of the ball drum mill with grinding balls should be selected depending on the characteristics of the material and the operating conditions of the mill to achieve maximum efficiency of grinding coal.*

Keywords: ball mill, loading degree, grinding intensity, grinding balls, energy efficiency.

REFERENCES

1. Shuvalov S.I., Novoseltseva S.S., Verenin A.A., Voroshilov O.A. Mathematical model of a vacuum system with a ball drum mill for the analysis of classification schemes // Bulletin of IGEU, Issue 5, 2017, pp. 10-18.
2. Zheng Yu., Kuznetsova M.M., After All V.E., Aleksina A.A. Experimental studies of the energy-efficient mode of grinding solid materials // Journal of Technical Physics, 2016, Volume 86, Issue 5.
3. Baigereev S.R. Substantiation of parameters and creation of a design of a rotary vibration shredder with the development of manufacturing technology. Dis. ... doc. phil. (PhD). Ust-Kamenogorsk, 2019. – 90 p.
4. Overview of software products for simulating the movement of grinding loading in mills. <https://scicenter.online/agregaty-i-protsessyi-scicenter/obzor-programmnyih-produktov-dlya-simulyatsii-173863.html>
5. Study of the grinding process on the example of a ball mill <http://www.gaps.tstu.ru/win-1251/lab/magistr/shar/win-1251/shm3.html>
6. Kuznetsova M.M. Vplyv sposobu podribnenea na virtati protsesu / M.M. Kuznetsova, V.E. Vedi // Integrirovani tehnologhii ta energosberejennea / schokvartalinyi naukovopraktichnii jurnal. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. – Nr. 2. – Pp. 18-22. (in Ukrainian).
7. Gavrunov A. Yu. Vibratory mill with longitudinal-transverse motion of grinding bodies: Dis. ... Candidate of Technical Sciences: 05.02.13 / Alexey Gavrunov. Place of protection: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, – Belgorod, 2014. – 167 p.
8. Biryukov A.B. Combustion and thermal processing of organic fuels. Solid fuel: a textbook / A.B. Biryukov, I.P. Drobyshchinskaya, Yu.E. Ruban. – Donetsk: GUZ «DonNTU», 2014. – 232 p.
9. Aksenov A.A. FlowVision: industrial computational fluid dynamics / A.A. Aksenov // Computer research and modeling. – 2017. – Vol. 9. – No. 1. – Pp. 5-20.
10. Khakhalev P.A. Improving the design of the stepped lining and the study of the grinding process in a ball drum mill / BSTU named after V.G. Shukhov. – Belgorod, 2017. – 177 p.
11. Turlubek A. The current situation and problems in the operation of power equipment // Energy. – 2013. – No. 3 (46). – Pp. 8-12.