ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2024;(7):91-110
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 004.94 DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_91

АНАЛИЗ МОДЕЛИ ИЗНАШИВАНИЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ В ПРОЦЕССЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РУДЫ

В.А. Плащинский[1], И.И. Белоглазов[1], Э.В. Ахмеров[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: SlavaPlash@yandex.ru

Аннотация: Рассмотрено имитационное моделирование процесса измельчения апатит-нефелиновой руды с определением параметров изнашивания футеровочных элементов мельницы в программе Rocky DEM. Проанализированы виды изнашивания, возникающие в шаровой мельнице, установлено, что в зависимости от крепости обрабатываемых пород и режима движения среды в шаровой мельнице может наблюдаться абразивный, ударно-абразивный или усталостный вид изнашивания. Представлены сведения о проведенных авторами экспериментах по установлению коэффициентов износостойкости материалов, используемых при изготовлении рабочих органов горного оборудования. На основании результатов моделирования установлено, что футеровки, работающие в водопадном режиме, демонстрируют ударно-абразивный вид износа, тогда как футеровка с каскадным режимом работы испытывает преимущественно абразивный вид износа, при этом в среднем линейный износ на 40–50% меньше, чем у предыдущих. При помощи рассчитанных программой параметров процесса измельчения определен срок службы моделируемых футеровок. На основании сравнения данных, полученных в экспериментальных условиях и результатах численного моделирования, заключили, что используемая в программе модель Арчарда позволяет с достаточной точностью моделировать процессы изнашивания, возникающие в шаровых мельницах, при различных режимах ее работы, при условии учета необходимых поправок на физико-механические свойства задаваемых материалов.

Ключевые слова: абразивное и ударное изнашивание, измельчение минерального сырья, шаровая мельница, износ футеровки, численное моделирование, DEM-метод, износостойкость, модель Арчарда.

Для цитирования: *Плащинский В. А., Белоглазов И. И., Ахмеров Э. В.* Анализ модели изнашивания рабочих элементов шаровой мельницы в процессе измельчения руды // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7. – С. 91–110. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_91.

The analysis of wear model of working members in ball mills during ore milling

V.A. Plaschinsky[1], I.I. Beloglazov[1], E.V. Akhmerov[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: SlavaPlash@yandex.ru

Abstract: The article discusses simulation modeling of apatite–nepheline ore milling process with determining wear parameters of mill lining in Rocky DEM. The analysis focuses on the wear and its types that arise in ball mills, and it is found that there are the abrasive, impact–abrasive and fatigue types of wear depending on the strength of the treated rocks and on the mode of motion of the treated media in the mill. The authors describe the tests aimed to determine the wear resistance indexes of materials used to manufacture working members of ball mills. From the modeling, it is found that ball lining experiences the impact–abrasive wear when operating in the mode of fall and the abrasive wear when operating in the cascade mode, and the linear wear in the latter case is on average 40–50% lower than in the other two modes. Using the program-calculated parameters of milling process, the service life of the model linings is determined. From the comparison of the testing and modeling data, it is concluded that the Archard wear equation used in the program enables sufficiently accurate modeling of wear processes in ball mills in different operating modes provided the required corrections are made for the physical and mechanical properties of the treated materials.

Key words: abrasive and impact wear, mineral material milling, ball mill, lining wear, numerical modeling, DEM method, wear resistance index, Archard model.

For citation: Plaschinsky V. A., Beloglazov I. I., Akhmerov E. V. The analysis of wear model of working members in ball mills during ore milling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(7):91-110. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_7_0_91.

Введение

В процессах обработки минерального сырья одну из главных статей производственных расходов составляют затраты на ремонт и замену изношенных рабочих частей основного оборудования [1 — 3]. Так, например, при эксплуатации барабанных мельниц расходы на воспроизводство изношенных шаров, стержней и элементов футеровки достигают доли энергетических затрат, а иногда и превышают их [4, 5]. Такой высокий расход материалов обогатительного оборудования объясняется интенсивным изнашиванием их об абразивные горные породы в процессе дробления и измельчения [6, 7]. Особенно негативное влияние на производственный процесс оказывает износ футеровочных плит мельниц, так как при уменьшении толщины изменяется их начальный геометрический профиль (высота плиты, передний угол и т.д.), соответственно, снижается способность поднимать загружаемый материал на определенную высоту, т.е. уменьшается аккумулируемая энергия, необходимая для разрушения перерабатываемого сырья, что, в свою очередь, ведет к резкому снижению производительности мельницы [8 — 10]. Исследования показали [11], что только уменьшение переднего угла грани плиты без уменьшения ее высоты может серьезно повлиять на эффективность процесса измельчения, поэтому рекомендованная величина износа, при которой следует заменить футеровочную плиту, составляет 10 — 20% по массе. С проблемой интенсивного износа борются при помощи изготовления лифтеров из износостойких материалов [12], применения различных видов упрочняющих обработок [5] и нанесения покрытий [8, 13, 14].

Классический подход к изучению процессов измельчения и изнашивания, возникающих в шаровой мельнице, за-

ключается в экспериментальном исследовании ее работы [8, 9, 11]. Однако выполнить комплексное исследование на работающем оборудовании не всегда представляется возможным — ввиду сопутствующих экономических потерь и нарушения непрерывности рабочего процесса [15, 16]. В то же время альтернативой натурным исследованиям могут служить получившие большое распространение методы компьютерного моделирования, которые позволяют исключить необходимость проведения натурных экспериментов [17 — 21].

Так, например, для исследований процессов измельчения активно применяется метод дискретных элементов (DEM), рассматривающий гранулированные материалы как совокупность отдельных взаимодействующих друг с другом частиц, каждая из которых управляется физическими законами [22, 23]. Использование данного метода позволяет прогнозировать кинематическое, динамическое и энергетическое поведение загружаемого материала, определять такие параметры, как нормальная и тангенциальная составляющие сил столкновений частиц, скорость удара, расстояние скольжения при их взаимодействии и так далее [24 — 26]. Используя различные программные продукты, в том числе реализующие метод DEM, специалисты определяют характеристики движения мельничных сред [27 — 29], прогнозируют износ элементов футеровки и мелющих тел [9, 10], а также определяют энергопотребление в различных условиях [29, 30].

В связи с этим комплексное использование таких методов, как компьютерное моделирование совместно с экспериментальным исследованием по изнашиванию материалов футеровочных плит, представляется перспективным способом решения проблемы износа, возникающего в работе мельниц. В работе приводятся данные по экспериментальному исследованию процесса изнашивания футеровочных элементов шаровой мельницы и динамическому моделированию процесса ее работы методом DEM в программе Rocky DEM.

Материалы и методы

Анализ процесса и материалы

В процессе эксплуатации горного оборудования, в том числе шаровых мельниц, в зависимости от рабочих параметров и свойств загружаемой среды возникают различные виды изнашивания рабочих органов: абразивный, ударный, ударно-абразивный, усталостный износ и др. Согласно данным, приведенным в исследовании [5], на вид износа в мельнице значительное влияние оказывает режим движения рабочей среды; так, в зависимости от скорости вращения барабана может возникать каскадный, каскадно-водопадный или водопадный режим работы. При каскадном режиме, возникающем при низкой скорости вращения барабана, рабочая среда поднимается по стенкам барабана и скатывается слоями вниз. При таком режиме работы разрушение материала обеспечивается главным образом раздавливанием и истиранием шарами и породой. При измельчении пород твердостью выше твердости материала футеровки возникает чисто абразивный износ. При этом поверхность рабочего органа, выполненного из данного материала, подвергается резанию твердыми частицами абразива. В результате данного воздействия поверхность металла принимает вид, представленный на рис. 1, *а*. При трении же деталей из стали по породам, имеющим твердость зерен меньше твердости стали, металл разрушается не в результате царапания его зернами, а по причине усталости в результате многократной упругой деформации его поверхностного слоя. Такой вывод подтверждается и видом поверх-

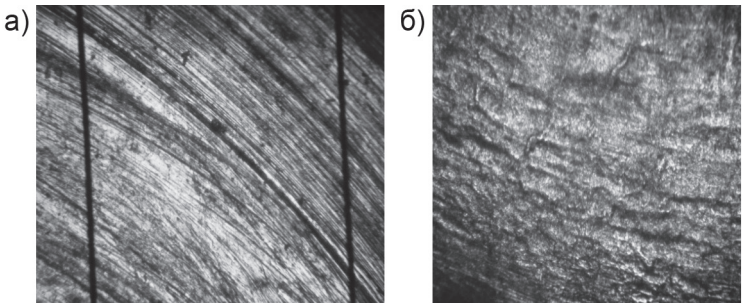


Рис. 1. Поверхность образца из стали 110Г13Л после изнашивания по граниту и габбро (а) и мрамору (б)
Fig. 1. The surface of the sample made of 110G13L steel after wear on granite and gabbro (a) and marble (b)

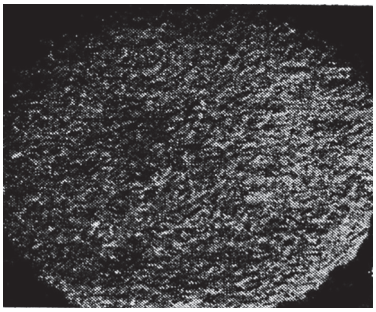


Рис. 2. Микрорельеф поверхности стали 110Г13Л при ударно-абразивном изнашивании
Fig. 2. Microrelief of the surface of 110G13L steel during impact-abrasive wear

ности стали после изнашивания по твердым и мягким породам (рис. 1, *б*).

Видно, что если в случае твердых пород (см. рис. 1, *а*) изнашиваемая поверхность испещрена царапинами, направленными по ходу вращения образца, то при изнашивании по мягким породам (см. рис. 1, *б*) — вся покрыта продолговатыми возвышенностями и микрократерами, характерными для пластического оттеснения при усталостном изнашивании.

При повышении скорости вращения барабана шары поднимаются все выше и возникает сначала переходный каскадно-водопадный, а затем водопадный режим работы, при котором шары после достижения верхней точки подъема сбрасываются затем на измельчаемую среду по круговой траектории. Измельчение породы при таком режиме происходит за счет ударов шаровой загрузки и истирания, при этом футеровка подвергается преимущественно ударному износу. В момент удара в местах контакта металла с зернами абразива происходит пластическое деформирование металла, в результате чего часть абразивных зерен внедряется в изнашиваемую поверхность, образуя лунки различной формы и глубины [5, 7]. При многократном пластическом деформировании выдавленных объемов металла происходит их отрыв в виде частиц. Качественным признаком ударно-абразивного изнашивания является специфическая поверхность, представляющая собой сочетание лунок, разделенных перемычками (рис. 2), при отсутствии шероховатости в виде рисок [5, 7].

Численные модели

Разработке модели, определяющей параметры изнашивания, возникающего при различных видах нагружения и рабочих условий, посвящено большое количество исследований [4, 7 — 9]. Среди наиболее известных моделей износа можно выделить теории Д. Гринвуда и Д. Триппа, Д. Арчарда [31], энергетическую теорию Г. Фляйшера [32], теорию А.С. Пронникова и др. Одной из основополагающих является теория советского специалиста И.В. Крагельского [33], которая учитывает большое количество факторов, поэтому ее можно использо-

вать для описания любого вида изнашивания, но чаще всего ее применяют для определения параметров усталостного износа. Основная идея теории в том, что при скольжении микронеровностей твердого тела относительного другого тела возникают напряжения сжатия и растяжения, которые имеют циклический характер и приводят к накоплению повреждений, в результате чего возникают продукты износа.

Другой известной моделью изнашивания является модель Д. Арчарда [31], которая нашла свое применение для описания адгезионного и абразивного изнашивания и используется в программе Rocky DEM. В модели изнашивание определяется через потерю единицы объема материала, которая зависит от сил трения, возникающих при контакте частиц с поверхностью материала. Объем изношенного материала определяется как

$$V = k\frac{F_t S_t}{H}, \qquad (1)$$

где V — объем материала, изношенный за единицу времени, м^3; F_t — тангенциальная составляющая силы, прилагаемой к поверхности частицей при контактном воздействии, Н; S_t — расстояние скольжения частицы по поверхности, м; H — твердость материала, подвергаемого износу, НВ; k — безразмерный эмпирический коэффициент.

В программе Rocky DEM поверхность объектов разбивается на элементарные треугольные участки (фасеты) с задаваемым пользователем размером поэтому изнашивание поверхности реализуется смещением вершин фасетов внутрь объекта. Расстояние, на которое перемещается каждая вершина, рассчитывается для того, чтобы сделать изменение объема равным значению dV, согласно следующему уравнению:

$$dV = K \cdot dE_t, \qquad (2)$$

где dV — объем материала, изношенного за время шага моделирования, м^3;

$dE_t = \int |F_t| dS_t$ — тангенциальная или сдвиговая работа, выполняемая частицами при столкновении с силой F_t с поверхностью на расстоянии S_t в течение одного временного шага, Дж; $K = C/H$ — коэффициент износа, постоянная, задаваемая пользователем, которая определяет величину работы, затрачиваемой на удаление единицы объема материала в течение временного шага, м^3/Дж. Ввиду того, что при реальных показателях износостойкости процесс моделирования изнашивания для получения заметных результатов займет много времени, в расчет данного коэффициента вводится параметр C, позволяющий сократить время моделирования в заданное количество раз.

Для оценки выполняемой частицами при столкновениях работы и других параметров в программе используются такие инструменты, как модуль сбора статистики столкновений различных групп частиц друг с другом и с геометрией и модуль энергетических спектров, который собирает энергию для нормальных и тангенциальных столкновений для каждого типа частицы за шаг времени и для каждого типа столкновения, учитывая все комбинации столкновений частица–частица и частица–граница.

Экспериментальное исследование

В предыдущей работе авторов [12] определялась износостойкость стали 110Г13Л в сравнении с износостойкостью сталей Hardox (H400, H500) фирмы SSAB Oxelosund AB и Miiluks (M450, M500) фирмы Miilux Oy в условиях их изнашивания трением по высокоабразивной породе. Кроме указанных сталей объектом испытаний служили углеродистые стали 45, У8, 65Г и чугуны СЧ21 и ВЧ35, как материалы, также исполь-

зующиеся для изготовления быстроизнашивающихся элементов горного оборудования, в том числе и футеровочных плит шаровых мельниц. В качестве материала сравнения была выбрана литейная сталь 25Л, широко применяемая в горном машиностроении.

Методика экспериментов заключалась в следующем: из проката, в состоянии поставки, и отливок материалов изготавливались цилиндрические образцы диаметром D = 8 мм, высотой H = = 35 мм. Половина образцов из сталей 45, У8А и 65Г подвергалась закалке (нагрев до 815 °С и выдержка, далее погружение в воду) и низкому отпуску при 200 °С. С использованием универсального твердомера Zwick/RoellZHU осуществлялся замер твердости образцов по методу Роквелла с дальнейшим пересчетом полученных единиц в шкалу Бринелля. В качестве абразивной среды использовался белый электрокорунд (25 А) с величиной зерна 250-315 мкм, как однородный высокоабразивный (a = = 250 мг) материал с твердостью основного компонента — Al_2O_3 (99,6%, масс.) ~2000 HV, существенно превышающей твердость всех изнашиваемых материалов.

Анализируемый образец материала фиксировался в удерживающем устройстве установки и прижимался своей торцевой поверхностью к поверхности абразива с постоянным усилием 100 Н. От электродвигателя через шпиндель и удерживающее устройство образцу передавался крутящий момент, обеспечивающий ему передвижение по абразиву по круговой траектории радиусом R = 9 мм с угловой скоростью 7,5 $с^{-1}$.

Определялась скорость изнашивания материала V_i [мг/мин], величина обратная V_i — определялась как износостойкость I_i [мин/мг]. Отношение износостойкости I_i материала к износостойкости

Таблица 1

Параметры процесса изнашивания анализируемых сталей и чугунов в сравнении с их твердостью
Parameters of the wear process of analyzed steels and cast irons in comparison with their hardness

Сталь	**V_i, г/мин**	**I_i, мин/г**	ε	**НВ**
25Л	0,53	1,90	1	187
ВЧ 35	0,48	2,08	1,10	159
45	0,46	2,19	1,15	216
СЧ 21	0,40	2,49	1,31	219
65Г	0,36	2,76	1,46	232
45з	0,31	3,26	1,72	441
М400	0,31	3,27	1,73	397
У8	0,30	3,28	1,73	234
Н450	0,27	3,76	1,98	455
Н500	0,25	3,94	2,08	487
М500	0,23	4,39	2,32	506
110Г13Л	0,16	6,43	3,39	233
65Гз	0,15	6,83	3,60	592
У8з	0,13	7,58	4,00	187

материала сравнения — стали 25Л — принималось за сравнительную износостойкость ε данной стали или чугуна.

Результаты

Результаты экспериментов

В табл. 1 представлены установленные значения V_i, I_i, ε анализируемых сталей и чугунов, расположенные в порядке возрастания износостойкости материалов. Там же приведены величины их твердости. Материалы расположены в порядке возрастания ε, в сопоставлении с их твердостью НВ.

Как следует из результатов экспериментов, испытанные материалы весьма существенно различаются по стойкости к воздействию высокоабразивной твердой среды: износостойкость I_i наиболее стойкого материала (стали У8 после закалки) примерно в 4 раза выше этого показателя для низкоуглеродистой стали 25Л при изнашивании. В целом, как можно заключить из данных табл. 1, порядок расстановки испытанных материалов по возрастанию износостойкости совпадает с их расстановкой по увеличению твердости, что находится в соответствии с общепринятой точкой зрения [12]. Из общего порядка выпадает сталь 110Г13Л, которая при сравнительно невысокой твердости (233*НВ*) показывает наиболее высокий коэффициент износостойкости, существенно превышающей (от 2 до 3,5 раз) величину I_i всех испытанных углеродистых сталей (в состоянии поставки). Нужно отметить, что полученный результат не подтверждает точку зрения [5], в соответствии с которой сталь 110Г13Л по стойкости к чисто абразивному изнашиванию не отличается от обычной углеродистой стали такой же твердости: при одинаковой твердости со сталями 65Г и У8 сталь 110Г13Л показывает существенно более высокую (примерно в 2 раза) износостойкость.

Используем в дальнейшем полученные данные по износостойкости различных материалов в моделировании изнашивания футеровки мельницы.

Результаты моделирования

В работе в качестве объекта моделирования выбрали шаровую мельницу типа МШЦ 5500*6500, используемую для измельчения апатит-нефелиновой руды со следующими техническими характеристиками: производительность мельницы Q = 300 — 310 т/ч, диаметр барабана без футеровки D = 5500 мм, длина барабана L = 6500 мм, рабочий объем мельницы V = 140 м^3, частота вращения n = 13,69 об./мин, шаровая загрузка m =

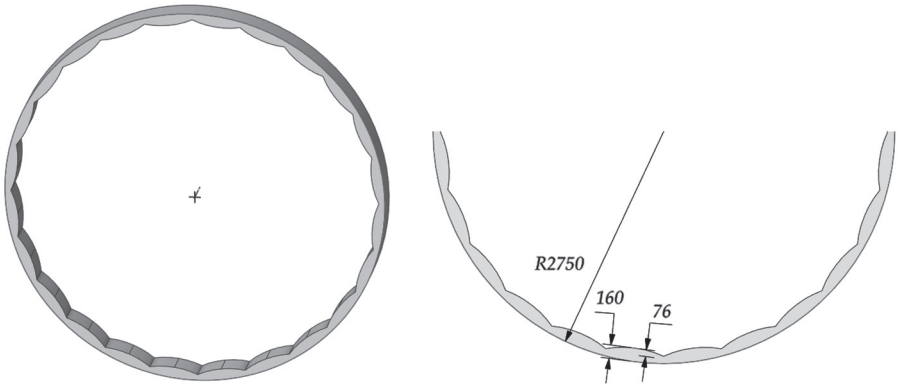


Рис. 3. Внешний вид моделируемого участка мельницы
Fig. 3. Appearance of the simulated mill site

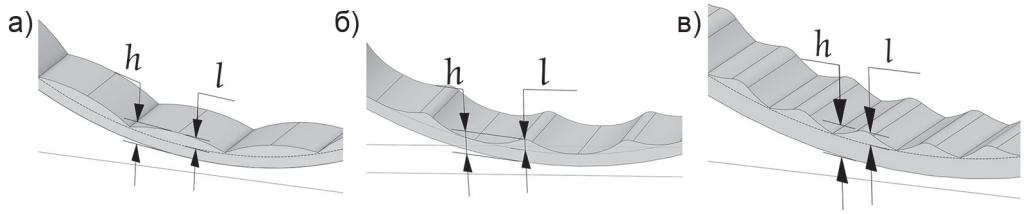


Рис. 4. Виды футеровок, использующихся в моделировании: футеровка 1 (а); футеровка 2 (б); футеровка 3 (в)

Fig. 4. Types of linings used in modeling: lining 1 (a); lining 2 (b); lining 3 (v)

= 275 — 285 т, степень загрузки шарами φ = 42%, материал футеровки — стали 110Г13Л. Профиль поверхности футеровочных плит — волнообразный; толщина футеровочной плиты 160 мм, из которой 76 мм высота.

Для сокращения времени расчета в качестве объекта для моделирования был взят не весь барабан мельницы, а участок конструкции шириной 0,4 м (рис. 3), поэтому величину загрузки шаров и породы определяли с учетом соотношения длины моделируемого участка L к длине всего барабана $L_б$, то есть $L/L_б$.

Для получения достаточного объема данных для сравнения проводили серию моделирований для нескольких видов волнистых футеровок (рис. 4), использующихся для измельчения в шаровой мельнице, геометрические параметры исходных профилей футеровок представлены на рис. 4, где h — высота всего профиля футеровки, l — высота волны. Для всех трех типов футеровок h = 160 мм, l = 76 мм.

Размер сетки конечных элементов конструкции задавали 0,1 м, исходя из рекомендаций наличия от пяти до десяти элементов сетки по ширине поверхности конструкции как достаточного для точного расчета износа и адекватного представления результатов [11]. Качество сетки было определено визуально по отсутствию сильно перекошенных элементов сетки или элементов, охватывающих слишком большой участок поверхности.

Для определения движения мельницы задавали два отдельных типа вращения (motion frame), первый из которых сообщал ей постоянное угловое ускорение 200 об/мин^2 в течение 3 с для быстрого выхода мельницы на стабильный режим работы, после чего включался

Таблица 2

Параметры загружаемой среды и конструкции барабана мельницы
Parameters of the loaded environment and geometry

Свойство	Порода (апатит-нефелиновая руда)	Шары	Футеровка
Плотность, кг/м^3	$3{,}2\cdot10^3$	$7{,}7\cdot10^3$	$7{,}7^*\cdot10^3$
Модуль Юнга, Н/м	$1\cdot10^8$	$2\cdot10^{11}$	$2\cdot10^{11}$
Сопротивление качению	0,15	0,001	0,05
Коэффициент Пуассона	0,25	0,3	0,3
Размер фракции, м	0,18 — 50% 0,06 — 30% 0,03 — 20%	0,1	—
Масса загрузки шаров и измельчаемой руды, кг	$4\cdot10^3$	$15{,}8\cdot10^3$	—

Таблица 3

Параметры контактных взаимодействий материалов [21]
Parameters of contact interactions of materials [21]

Параметры взаимодействия	Порода-порода	Порода-шары	Порода-футеровка	Шары-футеровка	Шары-шары
Коэффициент трения	0,8	0,5	0,3	0,15	0,15
Коэффициент восстановления	0,5	0,5	0,3	0,15	0,5

второй режим движения с постоянной угловой скоростью вращения 13,69 об/мин до конца времени моделирования.

В качестве моделей контактного взаимодействия были применены следующие: для контактов, действующих по нормали к поверхности частиц — модель гистерезисной линейной пружины [24]; для тангенциальных — кулоновская модель линейной пружины.

Ввиду того, что частицы породы представляют собой фрагменты неправильной формы с большим количеством граней, в качестве формы выбрали 10-угольный многогранник, для стальных шаров задавали форму сферы. Остальные параметры измельчаемой среды — апатит-нефелиновой руды и мелющих тел (стальных шаров) — приведены в табл. 2. В табл. 3 представлены параметры контактных взаимодействий: коэффициент трения и коэффициент восстановления, который определяет, какая доля начальной относительной скорости частицы восстанавливается к концу удара при столкновении с другим объектом [34, 35].

Исходя из степени загрузки мельницы шарами φ = 42%, определили величину массы загрузки шаров и породы для используемого в расчете участка мельницы, которая составила $15 \cdot 10^3$ кг и $4 \cdot 10^3$ кг соответственно.

При определении коэффициента износа K руководствовались тем, что он должен обеспечивать ускоренное изнашивание конструкции по сравнению с реальным, однако не должен приводить к очень быстрым и значительным изменениям геометрического профиля конструкции, нарушающим параметры рабочего режима мельницы. На практике определение K выполняется на основе калибровки по известным экспериментальным данным, таким как потеря высоты или массы футеровочных элементов со временем [10]. Согласно данным, полученным в производственных условиях [5], футеровку шаровых мельниц МШЦ 5500×6500 меняют при полном изнашивании волнообразного выступа в среднем через год (360 сут), что составляет l = 0,076 м/год.

В программе Rocky DEM убыль материала определяется в объемных единицах, поэтому линейный износ переводили в объемный, при этом принимали, что элемент футеровки по своей форме представляет собой часть цилиндра с радиусом r, тогда объем элемента выражается по формуле $V = 1/2\pi r2L$.

В соответствии с этим объем всех 24 элементов футеровки 1 будет равен V = 0,085 м^3, соответственно для футеровки 2 V = 0,087 м^3, для футеровки 3 V = 0,092 м^3.

Известно, что твердость материала является механическим свойством, характеризующим величину силы, приложенной по нормали к поверхности для внедрения на единицу площади, следовательно, твердость материала футеровки *HB* 220 (по шкале Бринелля) можно выразить в единицах давления $H = 2170 \cdot 10^6$ Па.

В соответствии с уравнением (2) находили энергию E_i, необходимую для изнашивания 24 элементов футеровки при ее работе за год:

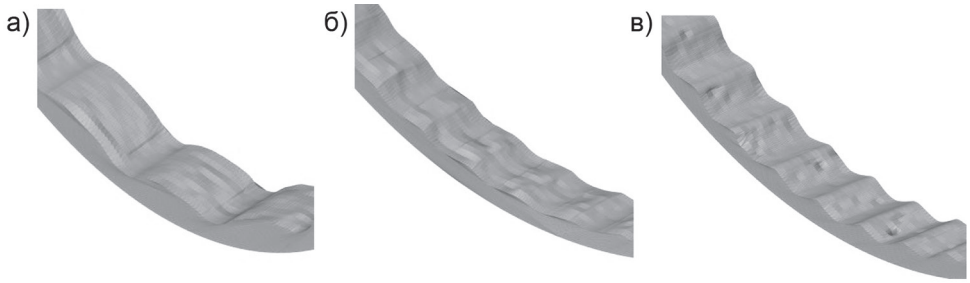


Рис. 5. Виды футеровок после проведения моделирования: футеровка 1 (а); футеровка 2 (б); футеровка 3 (в)
Fig. 5. The appearance of the linings after the simulation: lining 1 (a); lining 2 (b); lining 3 (v)

$$E_t = F_t S_t = V \cdot H = \\ = 0{,}087 \cdot 2{,}17 \cdot 10^9 = 188{,}79 \text{ МДж}. \quad (3)$$

Использовали полученное значение энергии для определения коэффициента износа K в моделировании. В коэффициент $K = C / H$ закладывается также и продолжительность моделирования, которую нужно выбрать так, чтобы получить ускоренный, но равномерный износ футеровки, и собрать достаточную статистику для оценки параметров процесса. В связи с этим продолжительность моделирования принимали 60 с. Для этого согласно формуле (2) в расчет коэффициента закладывали значение $C = 5{,}3 \cdot 10^5$, характеризующее указанное количество минут в пересчете на год, тогда с учетом этого параметр износа получился равным $K = 1 \cdot 10^{-5}$. Начало сбора статистики износа профиля задали через 5 с, после того как движение мельницы установится в стабильном режиме.

Полученную после симуляции геометрию футеровки загружали в программу Ansys Space Claim, в которой проводили замеры изношенных профилей футеровки. Принимали, что убыль линейных размеров материала вследствие износа может быть определена по изменению высоты профиля волны футеровки Δl. Полная объемная потеря материала V рассчитывалась при помощи программного модуля. Внешний вид изношенных элементов представлен на рис. 5, результаты измерений приведены в табл. 4.

Как можно видеть на рис. 5, *а*, значительная часть поверхности футеровки 1 содержит большое количество борозд, характерных для абразивного изнаши-

Таблица 4

Характеристики износа футеровки
Lining parameters

Вид футеровки	**Линейный размер выступа футеровки l, м**	**Линейный износ профиля футеровки Δl, м**	**Полный объем футеровки V, м³**	**Объем после моделирования V, м³**	**Убыль объема футеровки ΔV, м³**	**Процент изношенной поверхности от l, %**
$K = 1 \cdot 10^{-5}$						
Волнистая 1	0,076	0,03	0,085	0,032	0,053	39
Волнистая 2	0,076	0,045	0,087	0,014	0,073	59
Волнистая 3	0,076	0,05	0,092	0,010	0,082	65

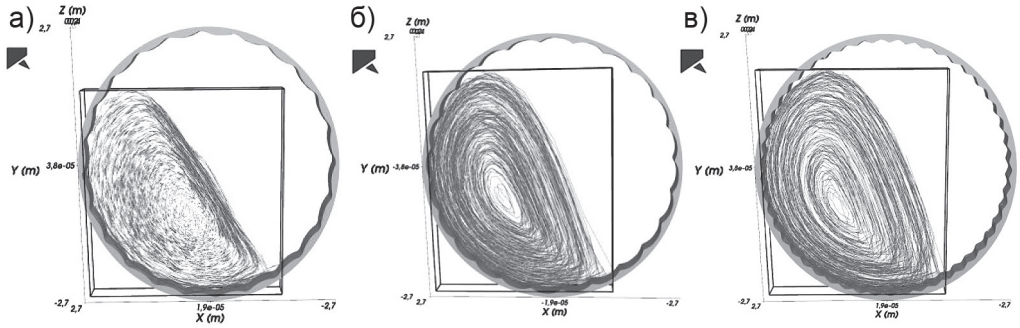


Рис. 6. Траектория движения среды в мельнице при использовании: футеровки 1 (а); футеровки 2 (б); футеровки 3 (в)

Fig. 6. The trajectory of the medium in the mill with: linings 1 (a); linings 2 (b); linings 3 (v)

вания, что хорошо соотносится с видом изношенной поверхности при абразивном износе, показанном на рис. 1, *а*. На поверхности футеровок 2 и 3 (см. рис. 5, *б*, *в*) кроме борозд можно видеть также и ямки, характерные для ударного износа, причем количество их увеличивается при переходе к футеровке 3, что позволяет заключить, что вид изнашивания у футеровок 2 и 3 является ударно-абразивным, соответствующим изображению данного вида изнашивания на рис. 2.

В табл. 4 приведены параметры анализируемых футеровок после проведения моделирования с учетом коэффициента K, принимающего в расчет время работы мельницы за год. Исходя из разности первоначального размера профиля поверхности l и износившегося за время моделирования, оценивали линейный износ профиля футеровки Δl, рассчитывали убыль объема футеровки ΔV, после чего определяли процент изношенной части футеровки от общего ее размера.

Как видно из данных табл. 4, наименьшую величину линейного износа демонстрирует футеровка 1, в среднем линейный износ на 50 — 66% меньше, чем у футеровок 2 и 3.

На рис. 6, 7 представлены траектория движения среды в мельнице и распределение скорости движения частиц среды.

Как можно заключить исходя из представленных рисунков, в мельнице с футеровкой 1 при заданных рабочих параметрах процесса возникает каскадный режим работы, характеризующийся тем, что внешние слои загружаемой среды поднимаются по круговым траекториям

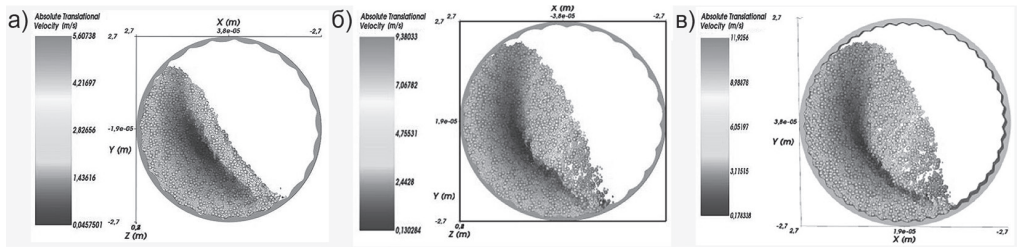
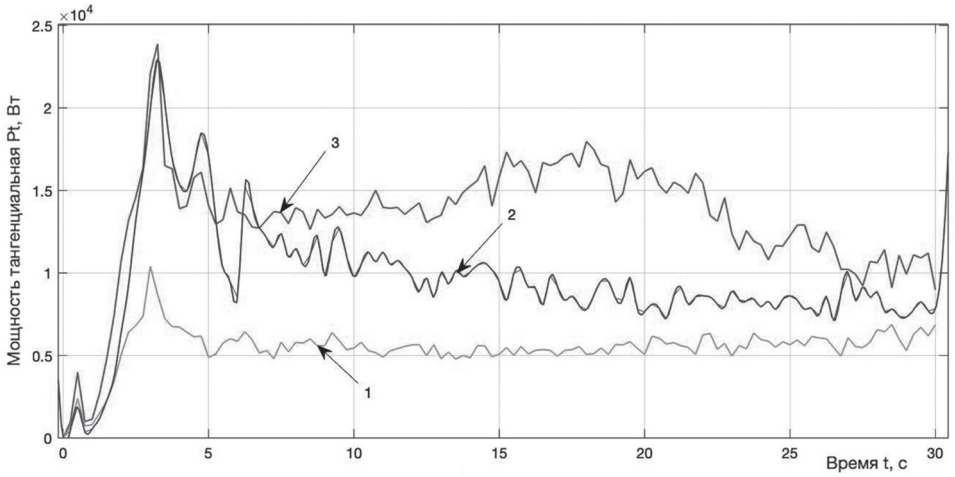


Рис. 7. Распределение скорости среды в мельнице при использовании: футеровки 1 (а); футеровки 2 (б); футеровки 3 (в)

Fig. 7. Distribution of the medium velocity in the mill with: linings 1 (a); linings 2 (b); linings 3 (v)



1 – футеровка 1; 2 – футеровка 2; 3 – футеровка 3

Рис. 8. Изменение общей тангенциальной мощности столкновений частиц во времени
Fig. 8. Dependence of the total tangential power of particle collisions over time

наверх, а затем скатываются параллельными слоями вниз (рис. 6, *а*), данный режим обеспечивает среднюю скорость падения частиц на футеровку в пределах v = 5 м/с (рис. 7, *а*). В то же время футеровки 2 и 3 обеспечивают водопадный режим работы, при котором внешние слои породы и шаров движутся к верхней точке подъема (рис. 6, *б*, *в*), после чего под углом падают на измельчаемую среду и футеровку (рис. 7, *б*, *в*), что обеспечивает большие значения скорости падения частиц на футеровку (v = = 10—12 м/с) по сравнению с водопадным режимом.

На рис. 8 представлены графики изменения мощности P_t, которая определяется через отношение энергии E_t, генерируемой от тангенциальных составляющих столкновений всех частиц породы и шаров с футеровкой, к времени моделирования t.

Как видно из диаграммы, мощность P_t устанавливается на одном уровне значений после перехода мельницы в стабильный режим работы (после 5 с).

В связи с этим для удобства представления данных на графике показаны первые 30 с времени моделирования. Можно отметить, что мельница с футеровкой 1 при каскадном режиме работы демонстрирует наименьший показатель P_t в пределах 6000 Вт, в то же время футеровка 2 и 3, благодаря водопадному режиму работы, обеспечивает соответственно в 1,66 и 2,5 раз большие значения мощности P_t, что обуславливает и большие значения величины износа данных футеровок при одинаковой продолжительности моделирования.

При помощи инструмента «энергетические спектры» программа Rocky DEM позволяет получить данные о том, как энергия передается между частицами при моделировании. Данные о столкновениях, собранные в ходе моделирования, классифицируются по трем типам энергии, связанным со столкновениями: энергия удара (энергия нормальных усилий при столкновении), энергия сдвига (энергия касательных усилий при столкновении) и рассеянная энергия (необратимо преобразованная в другие формы энергия во время столкновения частиц).

На графике рис. 9, *а* горизонтальная ось представлена в логарифмическом

масштабе, диапазон значений по этой оси определяется минимальной и максимальной величиной энергии сдвига E_t единичного столкновения частицы с границей футеровки, вертикальная же координата равна соответствующему значению мощности P_t, генерируемой от всех столкновений данной группы частиц с футеровкой при соответствующем значении энергии единичного столкновения. На рис. 9, *б* представленный график отличается от предыдущего тем, что характеризует суммарную мощность всех столкновений также в зависимости от величины энергии сдвига E_t единичного столкновения. То есть вертикальная координата суммарной мощности является результатом суммы вертикальных координат всех точек на кривой мощности, расположенных справа вплоть до данной точки.

Исходя из анализа данных диаграмм, можно сделать вывод, что, например, в процессе моделирования мельницы с футеровкой 3 (рис. 9, *а*) частицы породы сталкиваются с ней с энергией в пределах от $1 \cdot 10^{-4}$ до 1 Дж. Максимальная же суммарная мощность от всех столкновений данного диапазона энергий составляет около 5100 Дж (рис. 9, *б*). При этом можно сделать вывод, что наибольший вклад в генерирование суммарной

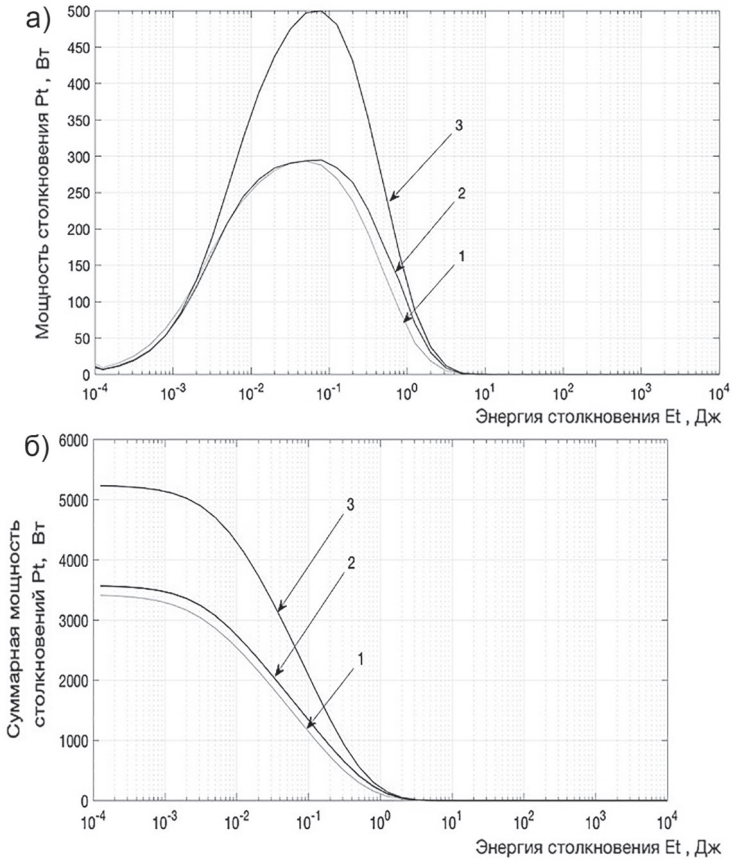


Рис. 9. Зависимости единичной (а) и суммарной (б) мощности столкновений частиц породы с футеровкой

Fig. 9. Dependence of the unit (a) and total (b) power of collisions of rock particles with lining

мощности оказывают удары с величиной энергии от 0,01 до 1 Дж, что также отражается и на вкладе в изнашивание футеровки. Из данных диаграмм, представленных на рис. 9, также видно, что футеровки 1 и 2 при этом демонстрируют в 1,6 раз меньшие аналогичные показатели, чем у вышеописанной футеровки 3, что связано с тем, что благодаря своей конструкции они генерируют меньшую кинетическую энергию падения частиц.

На основании результатов моделирования определяли количество времени, за которое исследуемые футеровки полностью утратят размеры своего геометрического профиля при заданных параметрах моделирования, что позволит нам оценить их предполагаемый ресурс t. Для этого брали отношение исходного объема V футеровок к убыли объема ΔV после моделирования, значения которых приведены в табл. 4.

Ввиду того, что установленная ранее продолжительность моделирования 60 с соответствует одному году эксплуатации мельницы, после которого полностью изношенная футеровка подлежит замене [5], значение t позволяет оценить, за какое количество времени футеровка утратит свой полезный объем V вследствие изнашивания в течение моделирования.

В соответствии с этим футеровка 3, с самой большой величиной потери объема материала из-за изнашивания, прослужит $t = V/\Delta V = 0{,}092/0{,}082 = 1{,}12$ года, или 9811 ч. В свою очередь ресурс футеровки 2 составляет t = 10 440 ч, а футеровка 1 прослужит t = 14 049 ч.

На рис. 10 показана общая мощность, потребляемая мельницей, полученная

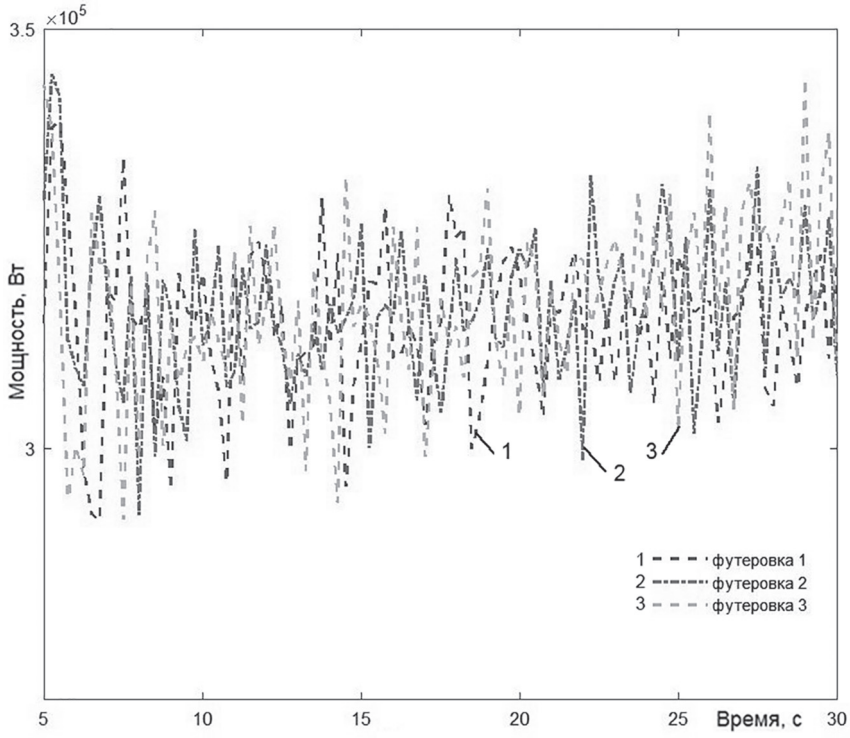


Рис. 10. Мощность, потребляемая мельницей
Fig. 10. Power consumed by the mill

Таблица 5

Сравнение аналитических и экспериментальных показателей
Comparison of analytical and experimental indicators

Сталь	Твердость, НВ	K	E_t, энергия сдвига, МДж	V_i, г/мин	$V_м$, г/мин
Сталь 45	200	$1 \cdot 10^{-5}$	174,00	0,46	0,84
Сталь 110Г13Л	235	$2{,}5 \cdot 10^{-5}$	204,45	0,16	0,75
Сталь Н450	450	$7 \cdot 10^{-5}$	391,50	0,27	0,44

по результатам моделирования после достижения стационарного режима работы мельницы (через 5 с). Можно отметить, что для всех типов футеровок значение мощности устанавливается примерно на одном уровне $3{,}2 \cdot 10^5$ Вт.

Пересчитав этот параметр с учетом реальной длины барабана мельницы в 6,5 м, получим среднее значение потребляемой мощности 4800 кВт. Можно отметить, что данная величина находится в диапазоне значений мощности электродвигателей главного привода, применяемых для данного типа мельниц (4000—5000 кВт).

Также был проведен ряд моделирований продолжительностью 60 с с конфигурацией 3 волнистой футеровки для нескольких марок сталей, имеющих разные показатели твердости *HB* и износостойкости V_i, определенной ранее в работе авторов [12] (табл. 5). По ранее описанной методике были определены параметры E_t и K для каждого материала. По величине износа, полученной в результате моделирования, определили показатель износостойкости $V_м$. На основании результатов табл. 5 можно заключить, что он имеет близкие значения с показателем V_i, определенным экспериментальным путем.

Из данных таблицы видно, что износостойкость $V_м$ всех материалов, включая сталь Гадфильда, так же как и при физических экспериментах, увеличивается с повышением твердости, однако в программе Rocky DEM последняя не демонстрирует высокую степень износостойкости, наблюдаемой в экспериментальных условиях, ввиду невозможности задания ее физико-механических свойств, ответственных за самоупрочнение.

Выводы и обсуждения

Установлено, что при одинаковых режимах работы в зависимости от геометрического профиля футеровки возникают различные режимы движения среды. Так, футеровка 1 обеспечивает возникновение каскадного режима работы мельницы, при котором возникает преимущественно абразивный износ поверхности. В мельницах с футеровкой 2 и 3 возникает водопадный режим с преимущественно ударно-абразивным видом износа.

Показатель износа поверхности минимален у футеровки 1, он на 50 и 66% меньше, чем у футеровок 2 и 3 соответственно. Данное обстоятельство объясняется тем, что в мельнице с футеровкой 1 при водопадном режиме движения среды генерируется значительно меньшая мощность от тангенциального взаимодействия частиц породы и шаров с футеровкой, чем в мельницах с футеровкой 2 и 3 (P_t в 1,6 и в 2,5 меньше соответственно).

На основании определенной величины ΔV рассчитан предполагаемый ресурс футеровок t, который составил для трех футеровок соответственно 14 049, 10 440 и 9981 ч.

В представленной работе установлена взаимосвязь физико-механических

параметров, характеризующих износостойкость и твердость, что в дальнейшем позволит сократить лабораторные испытания, необходимые для подбора футеровочных материалов, и значительно уменьшить время имитационного моделирования. Однако задание величины интенсивности износа с учетом экспериментально определенных показателей износостойкости нецелесообразно для тех материалов, которые способны приобретать значительное самоупрочнение, таких, например, как сталь Гадфильда, ввиду невозможности задания в программе физико-механических свойств.

Кроме этого, предложенная методология позволит подбирать футеровки и покрытия, используемые в процессе измельчения, в зависимости от свойств руды. При этом процесс измельчения может осуществляться с использованием как различных типов шаровых мельниц, так и различных типов футеровок. Это позволит предугадывать жизненный цикл использования композиционных материалов в процессе измельчения.

Необходимо также отметить, что профиль футеровки будет оказывать значительное влияние на характер движения среды в барабанной мельнице. В связи с этим при учете износа футеровки необходимо принимать во внимание не только свойства материала, но и динамический характер движения загрузки. По мере износа футеровки пропорционально увеличивается объем барабана и, соответственно, полезная мощность. Однако опыт эксплуатации барабанных мельниц показывает, что общие технико-экономические показатели измельчения с использованием тонких футеровок хуже, чем мельниц с наиболее толстой футеровкой.

Дальнейшие исследования в области моделирования процессов измельчения в барабанных мельницах должны быть связаны с формой футеровок и характером их износа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Пелевин А. Е.* Технологии обогащения железных руд России и пути повышения их эффективности // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 579—592. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.

2. *Ivanova P. V.*, *Ivanov S. L.*, *Mikhailov A. V.*, *Shishlyannikov D. I.* Extraction mechanization of soft soils // Journal of Applied Engineering Science. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 610—617. DOI: 10.5937/jaes19-31904.

3. *Пиирайнен В. Ю.*, *Михайлов А. В.*, *Баринков В. М.*, *Старовойтов В. Н.* Применение шламово-торфяной композиции для переработки отходов глиноземного производства // Обогащение руд. — 2022. — № 6. — С. 51—58. DOI: 10.17580/or.2022.06.09.

4. *Громыка Д. С.*, *Утенкова Т. Г.*, *Короткова О. Ю.* Обзор методов оценки механизмов изнашивания исполнительных органов горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 2. — С. 75—86. DOI: 10.25018/0236-14932021-2-0-75-86.

5. *Бочков В. С.*, *Болобов В. И.* О влиянии упрочняющей обработки материала футеровки шаровых мельниц на его износостойкость // Горный журнал. — 2017. — № 1. — С. 57—60. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.12.

6. *Shishlyannikov D. I.*, *Zvonarev I. E.*, *Rybin A. A.*, *Zverev V. Yu.*, *Ivanchenko A. A.* Assessment of changes in the abrasiveness of solid particles in hydraulic mixtures pumped with ESPs // Applied Sciences. 2023, vol. 13, no. 3, article 1885. DOI: 10.3390/app13031885.

7. *Болобов В. И.*, *Ахмеров Э. В.*, *Ракитин И. В.* Влияние вида горной породы на закономерности изнашивания коронки зуба ковша экскаватора // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6-2. — С. 189—204. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_189.

8. *Hu Q., Ji D., Shen M., Zhuang H., Yao H., Zhao H., Guo H., Zhang Y.* Three-body abrasive wear behavior of WC-10Cr3C2-12Ni coating for ball mill liner application // Materials. 2022, vol. 15, no. 13, article 4569. DOI: 10.3390/MA15134569.

9. *Wu W., Che H., Hao Q.* Research on non-uniform wear of liner in SAG mill // Processes. 2020, vol. 8, no. 12, article 1543. DOI: 10.3390/PR8121543.

10. *Zixin Y., Peng Y., Yuxing, Tongqing T., Zhencai Z., Zhangfa Y., Guiyi W.* Effect of the operating parameter and grinding media on the wear properties of lifter in ball mills // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2020, vol. 234, pp. 1061—1074. DOI:10.1177/1350650119894492.

11. *Zixin Y., Peng Y., Tongqing L., Guiyi Wu* DEM investigation of mill speed and lifter face angle on charge behavior in ball mills // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 394, no. 3, article 032084. DOI: 10.1088/1757-899X/394/3/032084.

12. *Bolobov V. I., Chupin S. A., Akhmerov E. V., Plaschinskiy V. A.* Comparative wear resistance of existing and prospective materials of fast-wearing elements of mining equipment // Materials Science Forum. 2021, vol. 1040, pp. 117—123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.117.

13. *Пряхин Е. И., Михайлов А. В., Сивенков А. В.* Технологические особенности поверхностного легирования металлических изделий Cr-Ni комплексами в среде расплавов легкоплавких металлов // Черные металлы. — 2023. — № 2. — С. 58—65. DOI: 10.17580/chm.2023.02.09.

14. *Bondarenko G. G., Andreev V. V., Stolyarov A. A., Tkachenko A. L.* Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high fields // Vacuum. 2002, vol. 67, pp. 617—621. DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00262-2.

15. *Cleary P., Morrison R., Sinnott M.* Prediction of slurry grinding due to media and coarse rock interactions in a 3D pilot SAG mill using a coupled DEM + SPH model // Minerals Engineering. 2020, vol. 159, article 106614. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106614.

16. *Boemer D., Carretta Y., Laugier M., Legrand N., Papeleux L., Boman R., Ponthot J.-P.* An advanced model of lubricated cold rolling with its comprehensive pilot mill validation // Journal of Materials Processing Technology. 2021, vol. 296, pp. 1—10. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117175.

17. *Каравайченко М. Г., Газалеев Л. И.* Численное моделирование двустенного шарового резервуара // Записки Горного института. — 2020. — Т. 245. — С. 561—568. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.8.

18. *Вишняков Г. Ю., Пушкарев А. Е., Ботян Е. Ю., Хлопонина В. С.* Обоснование рациональных режимов работы карьерных автосамосвалов при сверхнормативной эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 11-1. — С. 24—37. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_24.

19. *Жуков И. А., Голиков Н. С., Мартюшев Н. В.* Рационализация конструкции секции скребкового конвейера средствами автоматизированного метода анализа прочностных характеристик // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 142—150. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150.

20. *Shammazov I., Karyakina E.* The LNG flow simulation in stationary conditions through a pipeline with various types of insulating coating // Fluids. 2023, vol. 8, no. 2, article 68. DOI: 10.3390/fluids8020068.

21. *Karyakina E. D., Shammazov I. A., Voronov V. A., Shalygin A. V.* The simulation of ultra-high molecular weight polyethylene cryogenic pipeline stress-strain state // Materials Science Forum. 2021, vol. 1031, pp. 132—140. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1031.132.

22. *Liu Z.,Wang G., Guan W., Guo J., Sun G., Chen Z.* Research on performance of a laboratory-scale SAG mill based on DEM-EMBD // Powder Technology. 2022, vol. 406, article 117581. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2022.117581.

23. *Cleary P., Delaney G., Sinnott M., Morrison R.* Inclusion of incremental damage breakage of particles and slurry rheology into a particle scale multiphase model of a SAG mill // Minerals Engineering. 2018, vol. 128, pp. 92—105. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.026.

24. *Zixin Y., Tongqing L., Peng Y., Yuxing, Guiyi W.* Effect of lifter shapes on the mill power in a ball mill // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018, vol. 452, no. 4, article 042201. DOI: 10.1088/1757-899X/452/4/042201.

25. *Gutiérrez A., Ahues D., González F., Merino P.* Simulation of material transport in a SAG mill with different geometric lifter and pulp lifter attributes using DEM // Mining, Metallurgy and Exploration. 2019, vol. 36, pp. 431—440. DOI: 10.1007/s42461-018-0007-9.

26. *Chimwani, Ngonidzashe, Bwalya* Memory exploring the end-liner forces using DEM software // Minerals. 2020, vol. 10, article 1047. DOI: 10.3390/min10121047.

27. *Kolahi S., Chegeni M.* Investigation of the effect of the number of lifters on performance of pilot-scale SAG mills using discrete element method // Journal of Mining and Environment. 2020, vol. 11, pp. 675 — 693. DOI: 10.22044/jme.2020.9045.1793.

28. *Ndimande C., Cleary P., Mainza A., Sinnott M.* Using two-way coupled DEM-SPH to model an industrial scale Stirred Media Detritor // Minerals Engineering. 2019, vol. 137, pp. 259 — 276. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.03.001.

29. *Жуковский Ю. Л.*, *Королев Н. А.*, *Малькова Я. В.* Мониторинг состояния измельчения в барабанных мельницах по результирующему моменту на валу // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 686 — 700. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.

30. *Saldaña M., Gálvez E., Navarra A., Toro N., Cisternas L. A.* Optimization of the SAG grinding process using statistical analysis and machine learning: A case study of the chilean copper mining industry // Materials. 2023, vol. 16, article 3220. DOI: 10.3390/MA16083220.

31. *Archard J.* Contact and rubbing of flat surfaces // Journal of Applied Physics. 1953, vol. 24, pp. 981 — 988. DOI: 10.1063/1.1721448.

32. *Fleischer G.* Energetische methode der bestimmung des verschleisses // Schmierungstechnik. 1973, vol. 4, pp. 269 — 274.

33. *Kragelsky I. V.*, *Dobychin M. N.*, *Kombalov V. S.* Friction and wear. Pergamon Press, 1982, 484 p.

34. *Lvov V. V.*, *Chitalov L. S.* Semi-autogenous wet grinding modeling with CFD-DEM // Minerals. 2021, vol. 11, article 485. DOI: 10.3390/min11050485.

35. *Васильева Н. В.*, *Ерохина О. О.* Калибровка коэффициентов восстановления при ударе в DEM-моделировании сыпучих материалов // Обогащение руд. — 2020. — № 4. — С. 42 — 48. ГИАБ

REFERENCES

1. Pelevin A. E. Iron ore beneficiation technologies in Russia and ways to improve their efficiency. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 579 — 592. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.61.

2. Ivanova P. V., Ivanov S. L., Mikhailov A. V., Shishlyannikov D. I. Extraction mechanization of soft soils. *Journal of Applied Engineering Science*. 2021, vol. 19, no. 3, pp. 610 — 617. DOI: 10.5937/jaes19-31904.

3. Piirainen V. Y., Mikhailov A. V., Barinkov V. M., Starovoitov V. N. The use of sludge-peat composition for the processing of alumina production waste. *Obogashchenie Rud*. 2022, no. 6, pp. 51 — 58. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2022.06.09.

4. Gromyka D. S., Utenkova T. G., Korotkova O. Yu. Estimation methods of wear mechanisms in cutting heads of mining machines: Review. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 75 — 86. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-14932021-2-0-75-86.

5. Bochkov V. S., Bolobov V. I. On the effect of hardening treatment of the lining material of ball mills on its wear resistance. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 1, pp. 57 — 60. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.12.

6. Shishlyannikov D. I., Zvonarev I. E., Rybin A. A., Zverev V. Yu., Ivanchenko A. A. Assessment of changes in the abrasiveness of solid particles in hydraulic mixtures pumped with ESPs. *Applied Sciences*. 2023, vol. 13, no. 3, article 1885. DOI: 10.3390/app13031885.

7. Bolobov V. I., Akhmerov E. V., Rakitin I. V. Influence of rock type on regularities of excavator bucket tooth crown wear. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 6-2, pp. 189 — 204. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_189.

8. Hu Q., Ji D., Shen M., Zhuang H., Yao H., Zhao H., Guo H., Zhang Y. Three-body abrasive wear behavior of WC-10Cr3C2-12Ni coating for ball mill liner application. *Materials*. 2022, vol. 15, no. 13, article 4569. DOI: 10.3390/MA15134569.

9. Wu W., Che H., Hao Q. Research on non-uniform wear of liner in SAG mill. *Processes*. 2020, vol. 8, no. 12, article 1543. DOI: 10.3390/PR8121543.

10. Zixin Y., Peng Y., Yuxing, Tongqing T., Zhencai Z., Zhangfa Y., Guiyi W. Effect of the operating parameter and grinding media on the wear properties of lifter in ball mills. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2020, vol. 234, pp. 1061 — 1074. DOI:10.1177/1350650119894492.

11. Zixin Y., Peng Y., Tongqing L., Guiyi Wu DEM investigation of mill speed and lifter face angle on charge behavior in ball mills. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 394, no. 3, article 032084. DOI: 10.1088/1757-899X/394/3/032084.

12. Bolobov V. I., Chupin S. A., Akhmerov E. V., Plaschinskiy V. A. Comparative wear resistance of existing and prospective materials of fast-wearing elements of mining equipment. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1040, pp. 117 — 123. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1040.117.

13. Pryakhin E. I., Mikhailov A. V., Sivenkov A. V. Technological features of surface alloying of metal products with Cr-Ni complexes in the medium of melts of low-melting metals. *Chernye Metally*. 2023, no. 2, pp. 58 — 65. [In Russ]. DOI: 10.17580/chm.2023.02.09.

14. Bondarenko G. G., Andreev V. V., Stolyarov A. A., Tkachenko A. L. Modification of metal-oxide-semiconductor devices by electron injection in high fields. *Vacuum*. 2002, vol. 67, pp. 617 — 621. DOI: 10.1016/S0042-207X(02)00262-2.

15. Cleary P., Morrison R., Sinnott M. Prediction of slurry grinding due to media and coarse rock interactions in a 3D pilot SAG mill using a coupled DEM + SPH model. *Minerals Engineering*. 2020, vol. 159, article 106614. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106614.

16. Boemer D., Carretta Y., Laugier M., Legrand N., Papeleux L., Boman R., Ponthot J.-P. An advanced model of lubricated cold rolling with its comprehensive pilot mill validation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021, vol. 296, pp. 1 — 10. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117175.

17. Karavaichenko M. G., Gazaleev L. I. Numerical modeling of a double-walled spherical reservoir. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 245, pp. 561 — 568. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.8.

18. Vishnyakov G. Yu., Pushkarev A. E., Botyan E. Yu., Khloponina V. S. Justification of rational modes of operation of quarry dump trucks in case of over-normative operation. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 11-1, pp. 24 — 37. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_111_0_24.

19. Zhukov I. A., Golikov N. S., Martyushev N. V. Design rationalization of the scraper conveyor section by means of an automated method of strength characteristics analysis. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 142 — 150. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-142-150.

20. Shammazov I., Karyakina E. The LNG flow simulation in stationary conditions through a pipeline with various types of insulating coating. *Fluids*. 2023, vol. 8, no. 2, article 68. DOI: 10.3390/fluids8020068.

21. Karyakina E. D., Shammazov I. A., Voronov V. A., Shalygin A. V. The simulation of ultra-high molecular weight polyethylene cryogenic pipeline stress-strain state. *Materials Science Forum*. 2021, vol. 1031, pp. 132 — 140. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1031.132.

22. Liu Z.,Wang G., Guan W., Guo J., Sun G., Chen Z. Research on performance of a laboratory-scale SAG mill based on DEM-EMBD. *Powder Technology*. 2022, vol. 406, article 117581. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2022.117581.

23. Cleary P., Delaney G., Sinnott M., Morrison R. Inclusion of incremental damage breakage of particles and slurry rheology into a particle scale multiphase model of a SAG mill. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 128, pp. 92 — 105. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.08.026.

24. Zixin Y., Tongqing L., Peng Y., Yuxing, Guiyi W. Effect of lifter shapes on the mill power in a ball mill. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 452, no. 4, article 042201. DOI: 10.1088/1757-899X/452/4/042201.

25. Gutiérrez A., Ahues D., González F., Merino P. Simulation of material transport in a SAG mill with different geometric lifter and pulp lifter attributes using DEM. *Mining, Metallurgy and Exploration*. 2019, vol. 36, pp. 431 — 440. DOI: 10.1007/s42461-018-0007-9.

26. Chimwani, Ngonidzashe, Bwalya Memory exploring the end-liner forces using DEM software. *Minerals*. 2020, vol. 10, article 1047. DOI: 10.3390/min10121047.

27. Kolahi S., Chegeni M. Investigation of the effect of the number of lifters on performance of pilot-scale SAG mills using discrete element method. *Journal of Mining and Environment*. 2020, vol. 11, pp. 675 — 693. DOI: 10.22044/jme.2020.9045.1793.

28. Ndimande C., Cleary P., Mainza A., Sinnott M. Using two-way coupled DEM-SPH to model an industrial scale Stirred Media Detritor. *Minerals Engineering*. 2019, vol. 137, pp. 259 — 276. DOI: 10.1016/j.mineng.2019.03.001.

29. Zhukovskiy Y. L., Korolev N. A., Malkova Y. M. Monitoring of grinding condition in drum mills based on resulting shaft torque. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 256, pp. 686 — 700. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.91.

30. Saldaña M., Gálvez E., Navarra A., Toro N., Cisternas L. A. Optimization of the SAG grinding process using statistical analysis and machine learning: A case study of the chilean copper mining industry. *Materials*. 2023, vol. 16, article 3220. DOI: 10.3390/MA16083220.
31. Archard J. Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*. 1953, vol. 24, pp. 981 – 988. DOI: 10.1063/1.1721448.
32. Fleischer G. Energetische methode der bestimmung des verschleisses. *Schmierungstechnik*. 1973, vol. 4, pp. 269 – 274.
33. Kragelsky I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. *Friction and wear*. Pergamon Press, 1982, 484 p.
34. Lvov V. V., Chitalov L. S. Semi-autogenous wet grinding modeling with CFD-DEM. *Minerals*. 2021, vol. 11, article 485. DOI: 10.3390/min11050485.
35. Vasilyeva N. V., Erokhina O. O. Post-impact recovery coefficient calibration in DEM modeling of granular materials. *Obogashchenie Rud*. 2020, no. 4, pp. 42 – 48. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Плащинский Вячеслав Алексеевич[1] – канд. техн. наук,
e-mail: SlavaPlash@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0326-4514,
Белоглазов Илья Ильич[1] – канд. техн. наук,
доцент, e-mail: beloglazov_ii@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-1224-2117,
Ахмеров Эрик Викторович[1] – аспирант,
e-mail: s195040@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1692-4745,
[1] Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II.
Для контактов: Плащинский В.А., e-mail: SlavaPlash@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.A. Plaschinsky[1], Cand. Sci. (Eng.),
e-mail: SlavaPlash@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0003-0326-4514,
I.I. Beloglazov[1], Cand. Sci. (Eng.),
Assistant Professor,
e-mail: s195040@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1692-4745,
E.V. Akhmerov[1], Graduate Student,
e-mail: s195040@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-1692-4745,
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: V.A. Plaschinsky, e-mail: SlavaPlash@yandex.ru.

Получена редакцией 20.02.2023; получена после рецензии 26.01.2024; принята к печати 10.06.2024.
Received by the editors 20.02.2023; received after the review 26.01.2024; accepted for printing 10.06.2024.