

УДК 622.7

И. В. ХМЕЛЬ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕЗИНТЕГРАЦИИ МАГNETИТОВЫХ КВАРЦИТОВ В БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Математическое моделирование проведено с позиции баланса энергетических величин процесса дробления: работы внешнего силового воздействия и значения внутренней потенциальной энергии деформации кусков руды. Использовался метод конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния элементов загрузки. Показано, что выделенный в любом месте элемент загрузки подвергается деформированию со стороны соседних элементов (кусков руды) в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия контактными силами. Установлено, что механизм разрушения в барабане шаровой мельницы с резиновой футеровкой основан на наличии концентрации сдвиговых напряжений.

Ключевые слова: механизм разрушения, неравнокомпонентное сжатие, шаровая мельница, математическое моделирование, метод конечных элементов.

Математичне моделювання проведено з позицій балансу енергетичних величин процесу дроблення: роботи зовнішнього силового впливу та значення внутрішньої потенційної енергії деформації кусків руди. Використано метод кінцевих елементів для аналізу напружено-деформованого стану елементів завантаження. Показано, що на виділений у любому місці елемент завантаження діє деформування з боку сусідніх елементів (кусків руди) в умовах всебічного нерівно-компонентного тиску контактними силами. Встановлено, що механізм руйнування у барабані кулькового млина з гумовим футеруванням заснований на наявності концентрації зсувних напружень.

Ключові слова: механізм руйнування, нерівно-компонентний тиск, кульковий млин, математичне моделювання, метод кінцевих елементів.

Mathematical modeling is carried out from a position of power balance of crushing process: work of external power influence and value of internal potential energy of ore pieces deformation. The final element method for the analysis of the intense deformed condition of element loading was used. It is shown that the loading element allocated in any place is exposed to deformation from the neighboring loading elements (pieces of ore) in the conditions of comprehensive non-equal component compression by contact forces. It is established, the destruction mechanism in a spherical mill drum with rubber lining is based on existence of shift tension concentration.

The modeling results of the intense deformed condition of loading elements have confirmed that application of rubber wave lining allows using the appearing shift tension for material destruction in a mill that leads to decrease in process power consumption.

As scientific novelty for the first time on the modeling basis the existence of shift deformations at the loading elements movement in a mill drum with rubber lining is shown.

The practical importance of research is in justification of power consumption decrease of ore crushing in a ball mill with rubber lining due to shift deformations.

Keywords: the destruction mechanism, non-equal component compression, ball mill, mathematical modeling, final element method.

Введение. При обогащении полезных ископаемых разрушение горных пород для дальнейшего извлечения полезного ископаемого при его переработке – весьма сложный и энергоемкий физический процесс. Фактически от параметров этого процесса зависит рентабельность всего производства в целом. Использование данных существующего промышленного и научного опыта обогащения сырья в совокупности с применением современных компьютерных технологий инженерного анализа – это одна из концепций снижения энергоемкости передела руды.

Математическое моделирование в инженерном анализе на его современном уровне развития базируется на численном решении уравнений физики процесса, где ведущую роль играет высокоэффективный метод конечных элементов (МКЭ). Моделирование на основе геометрии объекта деформирования, свойств его материала и других параметров можно сравнить с его тестированием или построением его виртуального прототипа с высокой степенью адекватности.

Анализ исследований и публикаций и постановка проблемы. Последние исследования в рудоподготовке [1, 2] доказали существование в барабанных мельницах смешанного режима, который существенно отличается от принятого в теории Дэвиса. Поэтому рассматривая поперечное сечение барабана, считаем, что движение элементов загрузки состоит из трех этапов: подъем по круговой траектории, падение по параболической траектории и откат по контуру пяты. При этом существуют характерные области перехода с одной траектории на другую.

Модель основана на традиционной концепции – разбиение всего объема мельницы на элементы загрузки камеры, которые двигаются под силой массовых сил веса, центробежных сил инерции и реакции ограничивающей поверхности. Однако ранее созданные модели не учитывали взаимодействие элементов между собой и влияние свойств футеровки барабана [3, 4]. В предлагаемой модели основное внимание уделяется силам трения, поэтому учитываются силы взаимодействия между слоями элементов.

Таким образом, внутренний объем барабанной мельницы с загрузкой разбивается на плоские поперечные сечения, которые, в свою очередь, состоят из слоев элементарных элементов загрузки,двигающихся по траекториям. Полагаем, что указанные элементы загрузки, на которые разбит весь объем мельницы, имеют одинаковую форму с ребром Δl

Разрушение твердого тела происходит в том случае, если подведенной энергии достаточно для преодоления сил внутреннего сцепления. Величины показателей деформации и прочности, при прочих равных условиях, будут определять, прежде всего, некоторое сложное напряженно-деформированное состояние горной породы, характеризуемое взаимодействием каждого куска (объема) породы с другими кусками. На практике используются, так называемые, критерии разрушения (прочности), по которым и определяется момент разрушения породы в процессе внешнего воздействия на нее. Представленный подход предполагает изучение таких характеристик прочно-

© И. В. Хмель. 2016

сти материала, как модуль упругости и предел прочности. Их получают экспериментальным путем в условиях одноосного сжатия образцов, где эти характеристики усредняются в зависимости от размеров образцов.

Лабораторные исследования на сжатие образцов породы показывают свои закономерности процесса деформирования и разрушения материала горных пород. Изучение технико-минералогических разновидностей руд ПАО «СевГОК» на прочность при одноосном сжатии показало, что они отличаются как по своим вещественным свойствам (в частности, и по минеральному составу), так и характеру изменения прочностных характеристик (текстуры, структуры каждого образца), наложенных тектонических изменений, а также трещиноватости, возникшей в результате проведения буровзрывных работ в процессе добычи полезных ископаемых.

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением размера образцов от 1 мм до 100 мм прочность при одноосном сжатии силикатно-магнетитовых кварцитов снижается примерно в 8 раз, магнетито-силикатных кварцитов – в 3 раза, магнетитовых кварцитов – в 5 раз. Анализ результатов исследований показал, что прочность горной породы на сжатие в 5-10 раз выше предела прочности на сдвиг и в 8-15 раз выше предела прочности на растяжение. Установлено, что энергоёмкость при разрушении стандартных образцов магнетитовых руд на ПАО «СевГОК» при деформациях сжатия в 17,4 раза больше, чем при разрушении сдвиговыми напряжениями [5]. Экспериментально подтверждено, что исследуемые магнетитовые кварциты в зависимости от типа технико-минералогической разновидности различным образом ведут себя при сжатии и растяжении: прочность на сжатие выше прочности на растяжение.

Способ разрушения материала в шаровых мельницах комбинированный, то есть присутствует и раздавливание - истирание от качения шаров, соприкосновения слоев элементов загрузки и сдвиговые деформации на поверхности футеровки, удары от падения элементов загрузки с шарами. От того, какой способ будет преобладающим и какой вклад каждого из них, зависит количество энергии, расходуемой на образование единицы новой поверхности.

Результаты технико-экономического использования мельницы зависят от множества факторов. Основными из них являются: крупность питания, размер и распределение мелющих тел, объем загрузки, скорость вращения барабана, форма и материал футеровки. В работе **реализована идея** повышения эффективности измельчения за счет использования силы трения элементов загрузки о резиновую волновую футеровку внутренней стенки барабана мельницы и трения между слоями и элементами загрузки с соблюдением принципа: разрушение горной породы должно осуществляться за счёт создания преимущественно сдвиговых напряжений.

Экспериментальные исследования [3, 6, 7, 8] видов напряженного состояния при больших необратимых деформациях вплоть до остаточной прочности позволили установить, что возрастающая с ростом бокового давления степень измельчения пород при

деформации имеет предел. Достигнув минимального размера, элементы дробления перестают измельчаться при дальнейшем увеличении. Измельчаемость и как следствие раскрытие минеральных зерен определяется размерами структурных элементов: зерен и кристаллов. Обнаружение этого факта позволило понять механизм развития деформационных процессов в условиях изменения давления на минеральные частицы за счет изменения профиля футеровки и внести принципиальные коррективы в деформационную модель.

Цель и задачи исследований. Целью исследований явилось установить наличие сдвигового механизма разрушения материала в мельнице с измененным профилем футеровки, который является основной причиной процесса дезинтеграции (измельчения), на основе использования моделирования самого процесса разрушения материала.

При расчете напряженного состояния материала при деформации его в слое целесообразно и допустимо: в качестве основной характеристики прочности горных пород использовать предельное значение сдвиговой составляющей напряженного состояния; в качестве предельного по сдвиговым напряжениям значения использовать предел упругости, так как пределы прочности и запредельной прочности имеют у большинства видов горных пород на порядок меньшую зону (область) существования, а также высокий коэффициент хрупкости; для изучения напряженного состояния горных пород в условиях неравнокомпонентного сжатия использовать данные о свойствах горных пород, полученные экспериментально в условиях одноосного сжатия, при минимальных значениях на образцах бокового давления.

Материалы и методы исследований. Рассмотрим математическое моделирование процесса взаимодействия кусков горной породы в технологическом процессе дробления для получения уровня энергозатрат в виде потенциальной энергии деформации породы в слое. Моделирование плоского напряженного состояния выполняется на основе метода конечных элементов (МКЭ) [9] с применением пакета программ Solidworks.

Математическое моделирование построено на основе численного решения МКЭ, где основные зависимости напряженно-деформированного состояния элементов загрузки в барабанной мельнице представлены в описании типа конечного элемента.

Построение конечно-элементной модели напряженно-деформированного состояния загрузки мельницы включает следующие этапы:

1. Формирование геометрии модели, включающее определение геометрических мест характерных зон шаровой мельницы, учет хаотического положения кусков руды с учетом падения мелющих шаров, движения слоев элементов загрузки.
2. Генерация секи конечных элементов деформируемых кусков руды, шаров, внутренних стенок барабан.
3. Выделение граничных условий взаимодействия элементов.
4. Задание свойств материалов горной породы, размеров мелющих шаров и свойств футеровки барабана мельницы.

5. Моделирование действующей нагрузки на выделенные элемент и область руды.

6. Графическая интерпретация полученных результатов.

Анализ большого числа экспериментальных результатов показал [3, 5], что в условиях объемного неравнокомпонентного сжатия горные породы разрушаются за счет скачкообразного прорастания критически ориентированных сдвиговых трещин.

На основе выше представленного анализа можно выдвинуть гипотезу о наличии сдвигового механизма разрушения материала в мельнице с измененным профилем футеровки, который является основной причиной процесса дезинтеграции (измельчения).

В частности, в работах лаборатории [5–8] на основе многолетних экспериментальных исследований принята концепция о существовании двух видов прочности твердых тел: прочность на отрыв и прочность на срез (сдвиг). Как установлено, эти два вида прочности, а соответственно два вида сопротивления разрушению в чистом виде являются крайними случаями. Первый из них относится к области действия исключительно растягивающих напряжений, а второй – к области сдвигающих напряжений, действующих при высоких значениях бокового давления.

Для изучаемого технологического процесса измельчения горной породы в условиях изменения профиля футеровки с ребристой на волновую, учитывая то, что основным силовым фактором в нем является боковое давление (в виде силы и момента), при оценке сопротивления горной породы разрушению наиболее целесообразно принять концепцию оценки ее прочности по максимальным сдвиговым напряжениям.

В пользу принятого утверждения свидетельствует и установленный экспериментально механизм развития деформации за пределом прочности, одним из важных моментов которого является неизменность коэффициента необратимой поперечной деформации μ как до, так и за пределом прочности горной породы. Это постоянство (равенство) свидетельствует о развитии деформационного процесса за пределом прочности по плоскостям сдвига, сформированным до предела прочности. Число плоскостей сдвига в разрушаемом фрагменте возрастает до (момента наступления) предела прочности и убывает за этим пределом, при этом, согласно статистической модели, это число не влияет на показатель μ .

Зависимость остаточной прочности пород от вида напряженного состояния по аналогии с предельными зависимостями прочности и упругости можно описать экспоненциальным уравнением такого же вида.

При построении модели учитывались особенности нагружения кусков руды при движении в барабане мельницы с резиновой волновой футеровкой. В этом случае при смене профиля футеровки возникает боковое давление, в связи с этим существует возможность смещения зерен друг относительно друга из-за неоднородности по крупности всего слоя материала, а основным силовым фактором является боковое давление. Поэтому при оценке сопротивления горной породы разрушению наиболее целесообразно принять концепцию оценки ее прочности по максимальным сдвиговым напряжениям.

Данные различных исследований [4, 10] показывают, что в сдвиговом потоке могут существовать три основных механизма появления напряжений: трение, перенос импульса за счет перемещения элементов из одного слоя в другой и перенос импульса за счет столкновения между элементами. Все эти механизмы действуют при движении элементов загрузки в камере барабанной мельницы. Хотя они действуют одновременно, особенности барабанной мельницы позволяют выделить области движения элементов загрузки, где преобладает один из видов напряжений.

Рассмотрим процесс передачи импульса вглубь элементов загрузки, представив элементы загрузки, расположенные в плоскости сечения, в виде наклонной цепочки, которые, двигаясь вместе с остальной частью загрузки, подвергаются давлению от опоры и соседних элементов. С определенной степенью точности такие напряжения можно считать плоскими.

Внутренний объем барабанной мельницы с загрузкой разбивается на плоские поперечные сечения, которые, в свою очередь, состоят из слоев элементарных элементов загрузки,двигающихся по траекториям. Полагаем, что указанные элементы загрузки, на которые разбит весь объем мельницы, имеют одинаковую форму с ребром Δl

В ходе моделирования полагаем, что на тело, находящееся в состоянии равновесия, действуют внешние силы. При этом для него задается некоторое виртуальное (предполагаемое) поле перемещений, которое является искомым и характеризуется в каждой точке пространства значением вектора $\{\delta\}$. Равновесие будет полным только тогда, когда при произвольных вариациях перемещений виртуальная работа внешних воздействующих сил равна работе внутренних сил сопротивления (или потенциальной энергии) деформированного тела. При этом поле виртуальных перемещений на континууме деформированного тела должно быть представлено непрерывными функциями пространственных координат и удовлетворять кинематическим условиям на его границах.

С учетом условия непрерывности используемый вариационно-энергетический принцип метода перемещений теории упругости (деформированного тела) утверждает, что сумма изменений потенциальной энергии воздействующих внешних нагрузок dW_p и внутренней энергии деформации $d\Lambda$ при некотором поле перемещений $\{\delta\}$ равна нулю. То есть имеем:

$$d(\Lambda + W_p) = d(\Pi) = 0 \quad (1)$$

Работа воздействующих внешних нагрузок W равна по значению и противоположна по знаку потенциальной энергии сопротивления W_p деформируемого тела, т.е. $W_p = -W$. Таким образом, энергетическое состояние деформируемой механической системы характеризуется выражением вида $\frac{\partial(\Pi)}{\partial\{\delta\}} = 0$.

Каждое из составляющих потенциальной энергии деформирования Π является некоторой функцией от вектора перемещений $\{\delta\}$. Функционал потенциаль-

ной энергии для дискретной области определения деформируемого тела запишется в виде

$$\Pi = \sum_{e=1}^E (\Lambda^e - W^e) = \sum_{e=1}^E \Pi^e \quad (2)$$

где E – число элементов дискретной области определения; $\Pi^{(e)}$ – доля потенциальной энергии отдельного конечного элемента. Тогда запишем необходимые выражения для составляющих полной потенциальной энергии деформируемого тела на конечном элементе. Внутренняя энергия деформации для моделирования среды горных пород определяется выражением вида:

$$\Lambda^e = \int_{V^e} 1/2(\{\varepsilon\}^T \{\delta\}) dv, \quad (3)$$

где интегрирование ведется по объему конечного элемента – V^e .

Вычисление вектора напряжений $\{\delta\}$ проводится после решения основной системы уравнений, осуществляется по известным узловым значениям поля перемещений и деформаций конечного элемента. Для представления результатов расчета достаточно вычислить напряжения в узлах и в центре конечного элемента. Вектор напряжений в узле конечного элемента записывается в виде $\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^{(e)}$, где $[B]$ – матрица деформаций.

Решение этой задачи проверено на примере фрагмента слоя. Его конечно-элементная (КЭ) модель построена с применением КЭ объемного напряженно-деформированного состояния, где толщина фрагмента (в направлении оси Z) равна 1 мм.

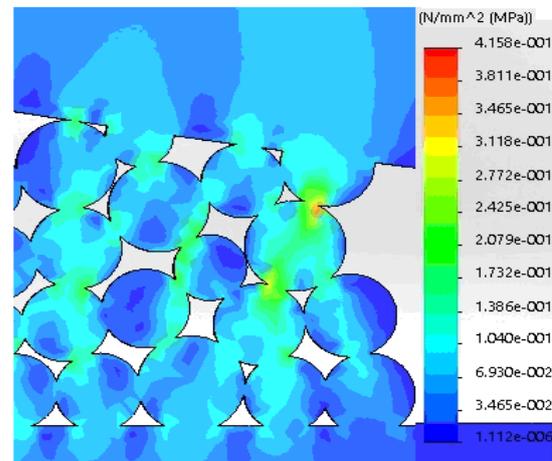
При моделировании плоско-нагруженного состояния среды выделим три характерных положения элемента загрузки.

В первом случае элементы загрузки в зоне пята находятся под давлением верхних шаров загрузки и упавшего шара мелющей среды, диаметром 40мм и скоростью в момент удара - 1 м/с. Учитывается реакция резиновой футеровки, размеры шаров и преобладающие нормальные напряжения. Во втором случае действует давление только верхних шаров загрузки, которое определяется насыпной плотностью материала и высотой слоя. Для расчета принята плотность $\rho = 5250 \text{ кг/м}^3$, и высота слоя – 1м. В третьем случае действует давление, но уже под некоторым углом.

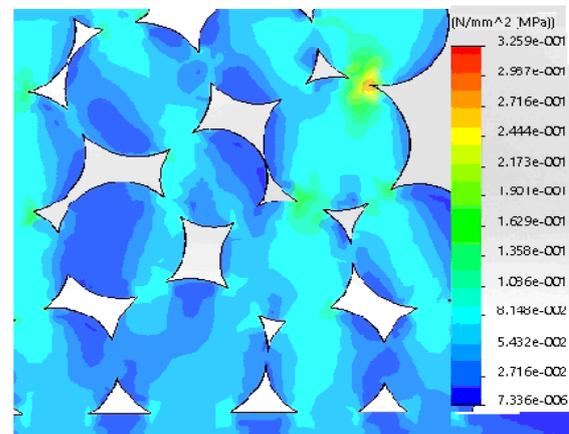
На рис. 1а) показаны расчетные напряжения, вызываемые на первом этапе движения элементов загрузки на резиновой поверхности футеровки после удара их шарами, падающими в районе пята.

На следующем шаге нормальные напряжения внутри элементов загрузки в области контакта с мелющим телом ослабевают, зато увеличиваются нагрузки со стороны элементов слоя. Второй характерный расчетный случай – исследование загрузки нижних элементов (кусков) загрузки под давлением

верхних элементов загрузки заданной высоты слоя и плотности элементов (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1 – Напряжения в элементах загрузки: а – после удара шаром; б – в середине слоя под давлением верхних элементов загрузки.

Далее происходит подъем элементов загрузки, и необходимо учитывать появление касательных напряжений и, соответственно, напряжений сдвига. На рис. 2 показаны напряжения в элементах загрузки в результате деформаций сдвига внутри загрузки зоне ее подъема.

Выделенный в любом месте куска породы элемент загрузки подвергается деформированию со стороны соседних элементов загрузки (кусков породы) в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия контактными силами. Данные силы определяют появление максимальных сдвиговых (касательных) напряжений τ , зависящих от возникающих в куске породы максимальных нормальных напряжений σ . Для этого элемента построены эпюры напряжений.

На рис. 3 показаны эпюры напряжений на указанный элемент в трех расчетных положениях.

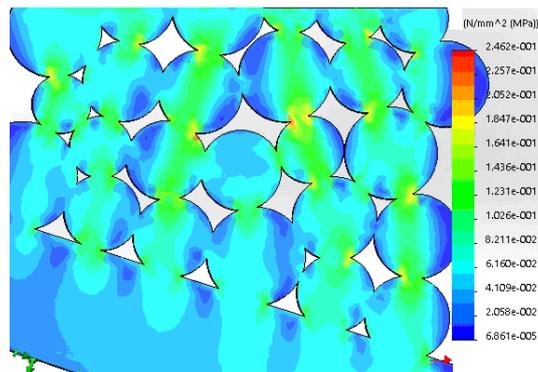


Рис. 2 – Напряжения в элементах загрузки в области предела прочности материала.

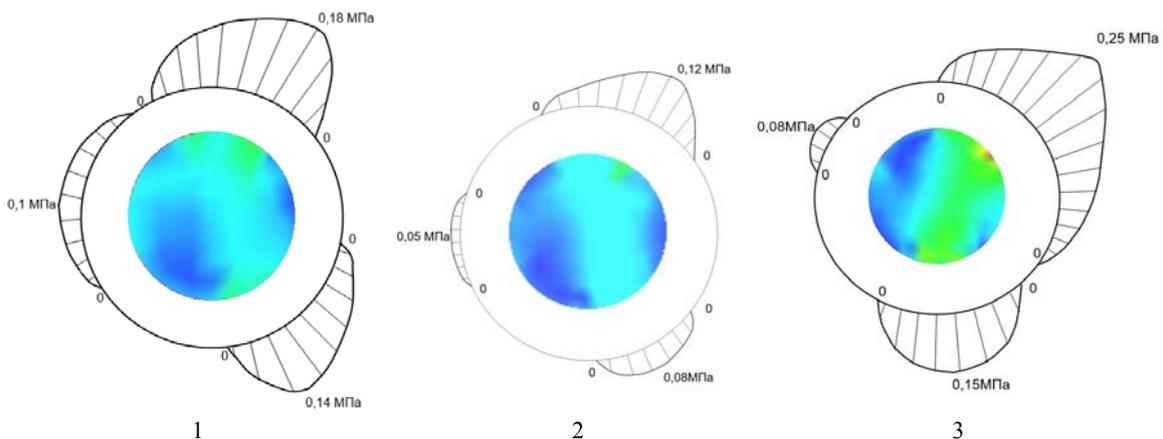


Рис. 3 – Эпюры нормальных напряжений для рассматриваемых положений элемента загрузки: 1 – первое расчетное положение, 2 – второе расчетное положение, 3 – третье расчетное положение

Расчеты показали, что наибольшие нормальные напряжения в элементе в середине расчетной области, находятся в третьем случае. При этом касательные напряжения также максимальные. Установлено, что при использовании резиновой футеровки касательные напряжения в 2 и более раз меньше нормальных. На основе исследования напряжений в кусках породы в слое загрузки методом конечных элементов на базе пакета Solidworks показано влияние сдвиговых напряжений на элементы загрузки. Показано, что механизм разрушения в барабане шаровой мельницы с резиновой футеровкой основан на наличии концентрации сдвиговых напряжений.

Разработанная модель подтверждена на полученных экспериментальных результатах. Применение резиновых футеровок конструкции резиновых и резинометаллических футеровок благодаря своим морфометрическим параметрам на СевГОКе в технологических схемах рудоподготовки позволило снизить удельный расход мелющих тел на 10 % и снизить удельный расход электроэнергии в целом на технологическую секцию на 10–12 % [6–8].

Выводы

1. Математическое моделирование проведено с позиции баланса энергетических величин процесса дробления: работы внешнего силового воздействия и значения внутренней потенциальной энергии деформации кусков руды и основано на использовании метода конечных элементов, анализа напряженно-

деформированного состояния элементов загрузки, учета сложной структуры взаимодействия кусков руды в слое частиц под давлением в процессе ее движения в барабанной мельнице.

2. Разработанная модель процесса измельчения магнетитовых кварцитов при условии изменения сдвиговых и ударных нагрузок позволяет рассчитать максимальные и минимальные нагрузки в элементах внутримельничной загрузки (руда, шары, вода, футеровка) при шаровом измельчении магнетитовых кварцитов с учетом формы и материала футеровки.

3. Показано, что выделенный в любом месте элемент загрузки подвергается деформированию со стороны соседних элементов загрузки (кусков руды) в условиях всестороннего неравнокомпонентного сжатия контактными силами. Данные силы определяют появление максимальных сдвиговых (касательных) напряжений, зависящих от возникающих в куске породы максимальных нормальных напряжений.

4. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния элементов загрузки подтвердили, что применение резиновой футеровки волнового вида позволяет использовать при разрушении материала в мельнице появляющиеся сдвиговые напряжения, что ведет к снижению энергоемкости процесса.

Список литературы:

1. *Маляров, П. В.* Основы интенсификации процессов рудоподготовки [Текст] / П. В. Маляров - Ростов - на- Дону, 2004. – 185 с.

2. Андреев, Е. Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник [Текст] / Е. Е. Андреев, О. Н. Тихонов - Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб, 2007. – 439 с.
3. Дырда, В. И. Резиновые футеровки технологических машин [Текст] / В. И. Дырда, Р. П. Зозуля, А. П. Левицкий, И. В. Хмель – Днепропетровск, 2014. – 255 с.
4. Науменко, Ю. В. Основи теорії режимів роботи барабаних млинів: Монографія [Текст] / Ю. В. Науменко. – Рівне: Вид-во СПД Зелент О.І., 2009. – 282 с.
5. Дырда, В. И. Кинетика измельчения минерального сырья в шаровых мельницах с резиновой футеровкой [Текст] / В. И. Дырда, В. А. Калашиников, И. В. Хмель, Е. В. Калганков // Геотехнічна механіка. – 2013. – № 108. – С. 89–96.
6. Дырда, В. И. Исследование влияния резиновых футеровочных плит на эффективность измельчения руды Северного ГОКа [Текст] / Т. А. Олейник., И. В. Хмель // Вісник КНУ. – 2013. – Вип. 34. – С. 123–127.
7. Олейник, Т. А. Исследования влияния профиля резиновой футеровки на процесс измельчения в барабанных мельницах [Текст] / Т. А. Олейник, И. В. Хмель // Вісник Криворізького технічного університету. Зб.наук.праць. – 2011. – Вип. 29. – С. 242–246.
8. Олейник, Т. А. Особенности процессов рудоподготовки при использовании мельниц с резиновой футеровкой [Текст] / Т. А. Олейник, И. В. Хмель // Вісник Криворізького технічного університету. Зб.наук.праць. – 2011. – Вип. 30. – С. 181–186.
9. Морозов, Е. М. Метод конечных элементов в механике разрушения [Текст] / Е. М. Морозов, Г. П. Никишков. – М.: Наука, – 1980. – 254 с.
10. Сэвидж, С. Тензор напряжений в потоке гранулированной среды при высоких скоростях сдвига: Пер. С англ. [Текст] / С. Сэвидж, Д. Джеффри // Механика гранулированных сред: теория быстрых движений. – М.: Мир, 1985. – С. 147–170.

Bibliography:

1. Malyarov, P. (2004). Bases of an intensification of ore dressing process. Monograph, Rostov - on - Don, 185.
2. Andreyev, E. Tikhonov, O. (2007). Crushing, grinding and preparation of raw materials for enrichment. Textbook, St. Petersburg state mining institute (technical university), SPB, 439.
3. Dyrda, N., Zozul, R., Levitsky, A., Hmel, I. (2014). Rubber linings of technological machines. Monograf, Dnipropetrovsk, 255.
4. Naumenko, Yu. (2009). Theory basis and drum mill operation. Monograph Rivne, SPD of Zelent, 282.
5. Dyrda, V., Kalashnikov, V., Hmel, I., Kalgankov, E. (2013). Kinetics of mineral raw materials crushing in ball mills with rubber lining. Geotekhnichna of a mekhanik, 108, 89–96.
6. Oleynik, T., Hmel, I. (2013). Research of influence of rubber lining plates on efficiency of Northern GOK ore crushing. Visnik KNU, 34, 123–127.
7. Oleynik, T., Hmel, I. (2011). Researches of influence of a profile of rubber lining on process of crushing in drum mills. Visnik of KNU, 29, 242–246.
8. Oleynik, T., Hmel, I. (2011). Features of ore preparation processes for mill with rubber lining. Visnik of KNU, 30, 181–186.
9. Morozov, E., Nikishkov, G. (1980). A method of final elements in mechanics of destruction. Monograph, Moscow: Science, 254.
10. Sevidj, S. (1985). About the tension tensor in a stream of the granulated medium at the high shift speeds. Mechanics of the granulated environments: the theory of fast movements, Moscow: World, 147–170

Поступила (received) 20.03.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Моделирование процесса дезинтеграции магнетитовых кварцитов в барабанной мельнице на основе использования метода конечных элементов/ И. В. Хмель// Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 17(1189). – С.83–88. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Модельовання процесу дезінтеграції магнетитових кварцитів в барабаних млинах на основі використання методу кінцевих елементів/ І. В. Хмель// Вісник НТУ «ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ «ХП», 2016. – № 17(1189). – С.83-88. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-5459.

Disintegration process modeling of the magnetite quartzite in a drum mill on the basis of a final elements method use/I. V. Khmil//Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Mechanical-technological systems and complexes. – Khar'kov: NTU “KhPI”, 2016. – No 17 (1189). – P.83–88. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-5459.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Хмель Ірина Віталіївна – аспірант, ДВНЗ «Криворізький національний університет», кафедра "Збагачення корисних копалин і хімії"; вул. XXII Партз'їзду , 11, г. Кривий Ріг, Україна, 50027; тел.: 098-110-48-30; e-mail: irina414@ukr.net.

Хмель Ірина Віталіївна – аспірант, ГБУЗ «Криворожський національний університет», кафедра «Обогащення корисних копалин і хімії»; ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, Украина, 50027; тел.: 098-110-48-30; e-mail: irina414@ukr.net.

Khmil Iryna Vitalievna – graduate, State institution of higher educational "Kryvyi Rih National University", Department "Mineral processing and chemistry"; Kryviy Rig, XXII party Assembly st. 11; Ukraine, tel.: 098-110-48-30; e-mail: irina414@ukr.net.