

УДК 621.926.47+553.87+542.22-162.25

**ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАБОТКИ МИНЕРАЛОВ В ДЕЗИНТЕГРАТОРЕ**

Ф. Х. Уракаев, Т. С. Юсупов

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, E-mail: urakaev@igm.nsc.ru,
просп. Академика Коптюга, 3, 630090, г. Новосибирск, Россия*

На основе численного моделирования дана целостная картина механической обработки и процессов активации веществ в дезинтеграторе. Рассчитаны кинематические и динамические характеристики упругих и неупругих соударений на примере обработки частиц галита, кварца и серы с рядами пальцев дезинтегратора. Даны рекомендации по выбору оптимальных условий обработки минерального и техногенного сырья в дезинтеграторе для раскрытия минеральных сростков и селективной активации минералов. Полученные результаты могут быть частично использованы и в других типах ударных измельчительных устройств, в частности струйных вихревых мельницах.

Дезинтегратор, кварц, галит, сера, обработка, кинематика и динамика

В работах [1–4] рассмотрен комплекс действий и проблем, посвященных селективному разрушению минеральных ассоциаций, которое в наибольшей степени способствует вскрытию и обогащению бедных, тонковкрапленных упорных руд и техногенного сырья. Решаемые при этом задачи включают: раскрытие сростков минералов в большей крупности; сохранение кристаллической структуры; оптимизацию дефектности, структурно-химических изменений и разделительных свойств рудных и породообразующих минералов; минимизацию энергозатрат и переизмельчения целевых компонентов минерального сырья. Считается, что 30–35 % потерь связано с недораскрытостью сростаний рудных и породообразующих минералов, которые переходят при обогащении в разряд техногенных геоматериалов [4]. Близкие значения недостатка извлечения ценных металлов вызваны превращением части рудной массы при измельчении в барабанных мельницах в тонкодисперсное состояние с крупностью частиц менее $(1.5–2.0) \cdot 10^{-5}$ м, для разделения которых пока не созданы эффективные методы.

Проведенные исследования показали, что в наибольшей степени названным критериям удовлетворяют измельчительные устройства, в которых механическое воздействие осуществляется при соударении единичной частицы обрабатываемого вещества с мелющим телом. Такой “свободный удар” происходит при взаимодействии частицы с неподвижной стенкой струйной вихревой мельницы [5] или с пальцами дезинтегратора [6, 7].

В настоящей работе рассматриваются теоретические и практические аспекты обработки частиц в дезинтеграторе. Физико-химические процессы, протекающие при обработке веществ в дезинтеграторе, могут быть обусловлены одновременным действием на ударно-фрикционном контакте импульсов температуры и давления и, как следствие, плавлением, деформацией и разрушением частиц [8, 9], включая сопутствующие фрактоэмиссионные явления [10].

Однако для оценки роли этих явлений в понимании возможностей дезинтегратора в аспекте как механической активации (МА) веществ, так и переработки геоматериалов для дальнейших технологических операций необходимо знание кинематических (траектории и скорости движения МА частиц) и динамических (нормальные и сдвиговые контактные силы) характеристик дезинтегратора. Из-за трудностей учета аэродинамических условий при работе на обычных струйных и ударно-центробежных мельницах, в том числе лабораторных и промышленных дезинтеграторах (оценки показывают, что для исключения этих условий достаточно иметь давление воздуха ~ 13 Па), корректный расчет названных параметров возможен только для вакуумируемых устройств [11]. Численные оценки характеристик обработки веществ в дезинтеграторе выполнены на основе теоретических исследований [12] в зависимости от геометрических параметров и угловых скоростей вращения корзин для трех разновидностей частиц: упругих (кварц), упругопластических (галит), пластичных (сера).

КИНЕМАТИКА УПРУГИХ СОУДАРЕНИЙ

Рассмотрим конкретный вакуумируемый четырехрядный пальцевый (пластины из твердого сплава ВК8) дезинтегратор I50A производства СКТБ “Дезинтегратор” [12, 13]. На его чертеже (рисунок) в радиальном от центра направлении l показаны только первые два ряда пальцев оппозитно вращающихся корзин с равными угловыми скоростями роторов электродвигателей $|\omega_1| = |\omega_2| = |\omega|$ и направляющая поверхность для дозируемых частиц, обеспечивающая начальные условия обработки частиц: прицельный параметр $p_0 = l_0$ и скорость $v_0 = l_0\omega$.

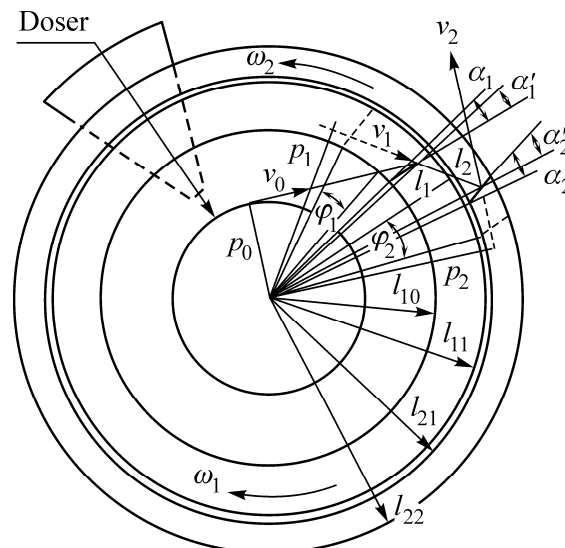


Схема движения частицы обрабатываемого вещества в дезинтеграторе [12]

При численных оценках кинематики соударений будем полагать, что сферические частицы с диаметром $2R = 1 \cdot 10^{-5}$ м, что много меньше отверстий-щелей форсунок дозатора ($2 \cdot 10^{-3}$ м), соударяются без разрушения с пальцами дезинтегратора в точках $l_i = l_{ii}$. Такой выбор соответствует максимальному значению фазового угла $\varphi(l_i) = \varphi(l_{ii}) = \varphi_m$ (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Необходимые геометрические величины для расчета кинематики соударений частиц обрабатываемых веществ с пальцами дезинтегратора [12]

Номер индекса i	Число пальцев n	$l_{i,i-1}$, м	l_{ii} , м	φ_m , град
0	—	0.025	—	—
1	6	0.044	0.052	16
2	12	0.056	0.062	21
3	16	0.065	0.071	16
4	18	0.074	0.078	10

При выводе представляющих наибольший интерес формул для относительной скорости соударения частицы с плоской поверхностью пальца $V_i = w_i + u_i$ и послеударных значений v_i и p_i движения частицы, где w_i и u_i — нормальная и тангенциальная компоненты вектора V_i относительно плоской поверхности пальца, использованы результаты решения задачи косоугольного удара [14, 15]. В предположении действия ξ -гипотезы Рауса [16, 17] получено:

$$\xi_i(1 + \gamma_i) \leq \frac{v_{i-1} \cos(\arcsin p_{i-1}/l_i + \alpha'_i) - l_i \omega \sin \alpha'_i}{l_i \omega \cos \alpha'_i + v_{i-1} \sin(\arcsin p_{i-1}/l_i + \alpha'_i)} = \frac{u_i}{w_i}. \quad (1)$$

Знак равенства указывает на обращение в нуль касательной составляющей послеударного значения скорости частицы относительно пальца i -го ряда ($u'_i = 0$) и совпадение времен нормального (ударного τ) и тангенциального (фрикционного τ') взаимодействия ($\tau_i = \tau'_i$). Если неравенство (1) соблюдается, то послеударная скорость $u'_i > 0$, а $\tau_i = \tau'_i$; если нарушается, то $u'_i \equiv 0$, а $\tau_i > \tau'_i$. Знак равенства в (1) имеет место только при некотором критическом значении динамического коэффициента трения $\xi^* = \xi_i = u_i / (1 + \gamma_i) w_i$.

Согласно упругим моделям соударений [14, 15], рассмотрим удары только с коэффициентом восстановления Ньютона $\gamma = 1$. Этому соответствует значение $\xi_1 = u_1 / 2w_1$. Поскольку значение ξ в общем случае неизвестно и может быть определено только опытным путем или, как в нашем случае, расчетом, если в качестве его стартового значения примем величину $\xi = \xi_1$, то для его последующих значений получим $\xi_i = u_i / 2w_i$. В расчете кинематики природа частиц учитывается только фиксированными значениями γ и ξ , поэтому они справедливы для любого рода частиц. В табл. 2 обобщены результаты вычислений.

ТАБЛИЦА 2. Кинематические характеристики ударной обработки частицы в дезинтеграторе при частоте оппозитного вращения корзин $\omega = 10000$ об/мин = 1047 рад/с = 167 с⁻¹ [12]

Номер индекса i	ξ	w , м/с	u , м/с	V , м/с	v , м/с	p , м
0	—	—	—	—	26	0.025
1	0.274	42	23	48	96	0.052
2	0.055	150	17	151	220	0.061
3	0.081	280	45	284	350	0.070
4	0.066	420	56	424	500	0.076

ДИНАМИКА УПРУГИХ СОУДАРЕНИЙ

Для изучения динамики ударных процессов наиболее широко используется нелинейно-упругая теория Герца [14, 15, 17], в которой принимается следующая связь между ударной силой f и общей деформацией ε соударяющихся тел: $f = B\varepsilon^{3/2}$. Коэффициент B зависит от свойств материалов тел и кривизны их поверхностей в точке контакта. При расчете динамических харак-

теристик удара и возникающего в результате диссипативных процессов импульса температуры $\Delta T(y, t)$ в окрестности y ударно-фрикционного контакта частицы воспользуемся рассчитанными значениями w и u . Оценки проведены по формулам в [17, 18] для соударения шара (сферическая частица радиусом $R = 5 \cdot 10^{-6}$ м) и плоскости (плоская поверхность пальца из сплава ВК8 с податливостью $\underline{\theta} = 0.85 \cdot 10^{-11}$ м²/Н или Па⁻¹ [19]):

время соударения (контакта) $\tau = 2.92R\rho^{0.4}(\theta + \underline{\theta})^{0.4}w^{-0.2}$, (2)

площадь (радиус r) контакта $s = \pi r^2 = \pi R^2 \rho^{0.4}(\theta + \underline{\theta})^{0.4}w^{0.8}$, (3)

максимальная контактная сила $f = 5.27\rho^{0.6}(\theta + \underline{\theta})^{-0.4}w^{1.2}$, (4)

напряжение в центре контакта $\sigma = 2.54\rho^{0.2}(\theta + \underline{\theta})^{-0.8}w^{0.4}$, (5)

среднее напряжение $\langle \sigma \rangle = 2\sigma/3 = 1.69\rho^{0.2}(\theta + \underline{\theta})^{-0.8}w^{0.4}$, (5a)

общая деформация $\varepsilon' = \varepsilon + \underline{\varepsilon} = R\rho^{0.4}(\theta + \underline{\theta})^{0.4}w^{0.8}$, (6)

где $\varepsilon\underline{\theta} = \underline{\varepsilon}\theta$ и из (6) следует $\varepsilon = \varepsilon'\theta/(\theta + \underline{\theta})$. (6a)

В [12, 18] получено выражение для максимального значения импульса температуры $\Delta T_{i\max}$ на ударно-фрикционном контакте частицы с пальцем дезинтегратора:

$$\Delta T_{i\max} = 0.5i\text{Erfc}[0]\xi_i\langle\sigma_i\rangle u_i(\tau'_i/\rho\lambda c)^{0.5} = 0.2821 \cdot \xi_i\langle\sigma_i\rangle u_i(\tau'_i/\rho\lambda c)^{0.5}. \quad (7)$$

Здесь $\tau'_i = \tau_1$; $\tau'_i(i = 2, 3, 4) = 0.707\tau_i(\xi_i/\xi_1)^{0.5}$; $i\text{Erfc}[0] = 0.5642$ [20].

Численные оценки по формулам (2)–(7) представлены в табл. 3, 4.

ТАБЛИЦА 3. Физические свойства частиц [21, 22]

Кристалл	ρ , кг/м ³	$c \cdot 10^{-2}$, Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·К)	$E \cdot 10^{-10}$, Па	ν	$\theta \cdot 10^{11}$, м ² /Н	$(\theta + \underline{\theta}) \cdot 10^{11}$, м ² /Н	$m \cdot 10^{12}$, кг*
α -Кварц	2650	7.9	7.4	9.56	0.073	3.40	4.25	1.39
Галит	2163	8.6	6.3	3.70	0.252	10.14	10.99	1.13
α -Сера	2070	7.1	0.27	1.80	0.342	19.62	20.47	1.08

*При радиусе частиц $R = 5 \cdot 10^{-6}$ м их масса $m = 4\pi R^3\rho/3$; ρ — плотность; c — удельная теплоемкость; λ — теплопроводность; E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $\theta = 4(1 - \nu^2)/E$ — податливость

ТАБЛИЦА 4. Динамические характеристики ударной обработки частиц при $\omega = 167 \text{ с}^{-1}$

Номер индекса i	$\tau \cdot 10^8$, с	$\tau' \cdot 10^8$, с	$f \cdot 10^2$, Н	$s \cdot 10^{12}$, м ²	$\varepsilon \cdot 10^7$, м	$\sigma \cdot 10^{-9}$, Па	$\langle \sigma \rangle \cdot 10^{-9}$, Па	$\Delta T_{i\max}$, К
α-Кварц								
1	1.15	1.15	1.86	2.60	1.32	10.87	7.24	350
2	0.89	0.28	8.58	7.19	3.66	18.08	12.05	42
3	0.79	0.30	18.15	11.84	6.03	23.21	15.47	220
4	0.725	0.25	29.53	16.38	8.34	27.29	18.20	240
Галит (NaCl)								
1	1.55	1.55	1.13	3.50	2.056	4.88	3.25	210
2	1.20	0.38	5.20	9.69	5.69	8.12	5.41	26
3	1.06	0.41	11.00	15.97	9.38	10.42	6.95	135
4	0.98	0.34	17.88	22.09	12.97	12.26	8.17	145
α-Сера								
1	1.95	1.95	0.86	4.41	2.62	2.94	1.96	770
2	1.51	0.48	3.95	12.2	7.45	4.89	3.26	95
3	1.34	0.51	8.35	20.1	12.28	6.28	4.19	490
4	1.23	0.43	13.60	27.8	16.98	7.39	4.93	530

Отклонения при расчетах по теории Герца увеличиваются с возрастанием нормальной скорости соударения w ввиду появления пластических деформаций и потерь на внутреннее трение. Решение задач динамики упругопластического взаимодействия основано на эмпирическом законе Герстнера [14–18], согласно которому при переходе за предел упругости упругая и пластическая компоненты деформации развиваются независимо друг от друга. Так как модель эмпирическая, то в основном уравнении $f = b\varepsilon^e$ константы b и e подлежат экспериментальному определению [23]. Последовательное применение этой модели к оценке скоростных, силовых и временных характеристик удара не приводит к их значительному отличию от вычисленных по теории Герца (см. табл. 2, 4), но дает возможность определять остаточные деформации и коэффициент восстановления Ньютона γ .

Можно оценить нагрев частиц при их упругопластическом взаимодействии с пальцем дезинтегратора исходя из простых энергетических соображений с учетом данных табл. 2–4. Допустим, что при наличии остаточных деформаций частица малого радиуса (в нашем случае $R = 5 \cdot 10^{-6}$ м) будет нагреваться однородно и повышение ее температуры ΔT^* найдется из простого соотношения: $mc\Delta T^* = mV^2/2$ или $\Delta T^* = V^2/2c$. Поскольку время между соударениями не превышает 10^{-3} с, то можно предположить, что перед следующим столкновением частица не успевает остыть и, следовательно,

$$\Delta T_{i+1}^* = \Delta T_i^* + V_{i+1}^2/2c. \quad (8)$$

Оценки по (8) в дополнение к табл. 4 дают для ударно-пластической деформации частиц: $\alpha - \text{SiO}_2 - \Delta T_1^* = 1.5$ К, $\Delta T_2 = 16$ К, $\Delta T_3^* = 67$ К, $\Delta T_4 = 180$ К; $\text{NaCl} - \Delta T_1^* = 1.3$ К, $\Delta T_2^* = 14$ К, $\Delta T_3^* = 61$ К, $\Delta T_4^* = 165$ К; $\alpha - \text{S} - \Delta T_1^* = 1.6$ К, $\Delta T_2^* = 18$ К, $\Delta T_3 = 74$ К, $\Delta T_4^* = 200$ К.

Скорее всего, частица нагревается неоднородно и существует градиент температуры, возрастающий к области более интенсивных деформаций. С другой стороны, трудно отрицать и возможность остывания частицы в промежутке между соударениями. Поэтому приведенные значения ΔT^* можно рассматривать только в качестве первого приближения.

КИНЕМАТИКА И ДИНАМИКА АБСОЛЮТНО НЕУПРУГИХ СОУДАРЕНИЙ

Выше мы полагали $\gamma = 1$. Очевидно, при абсолютно неупругом соударении ($\gamma = 0$) в зависимости от значения ξ частица либо прилипнет к поверхности пальца (условия для послеударных скоростей $w'_i = -\gamma w_i \equiv 0$ и $u'_i = 0$ отвечают явлению самофутеровки пальцев дезинтегратора), либо продолжит движение, согласно (1), с учетом $\gamma = 0$. Модель удара (закон Герстнера), промежуточная между неупругими и упругими взаимодействиями, не приводит к значительным поправкам и не меняет физической сущности явлений.

Расчет кинематики неупругого соударения в [12] выполнен при допущении, что частица, ударяясь в точку l_i пальца i -го ряда, останавливается, затем движется в течение времени $t = t_i$ по поверхности пальца на периферию и вылетает из точки $l = l_{ii}$ со скоростью u_i . Эта модель действительна, если $\gamma \equiv 0$, а время неупругого взаимодействия много меньше времени последующего движения частицы вдоль пальца по координате x_i (при оценках положено $l_i = l_{i,i-1}$). Значения t_i , u_i , v_i и p_i в [12] определяются итерациями, поэтому приведем выражения только для тепловыделения Q_i и импульса температуры ΔT на контакте частицы при его скольжении вдоль поверхности пальца, где s_i дано по (3):

$$Q_i = m[\omega^2(l_{ii}^2 - l_i^2) + u_i^2]/2; \quad \Delta T_i = Q_i \text{Erfc}[0]/s_i(\lambda \rho c t_i)^{0.5}. \quad (9)$$

Вычисления по (9) для абсолютно неупругих столкновений сферических частиц радиусом $R = 5 \cdot 10^{-6}$ м и массой $m = 4\pi R^3 \rho / 3$ с первым рядом пальцев дезинтегратора при $\omega = 10\,000$ об/мин = 167 с^{-1} ($u_1 = 26$ м/с, $t_1 = 6 \cdot 10^{-6}$ с) дают: $\alpha - \text{SiO}_2 - Q_1 = 4.9 \cdot 10^{-10}$ Дж, $\Delta T_1 = 11$ К; $\text{NaCl} - Q_1 = 4.0 \cdot 10^{-10}$ Дж, $\Delta T_1 = 7.7$ К; $\alpha - \text{S} - Q_1 = 3.8 \cdot 10^{-10}$ Дж; $\Delta T_1 = 31$ К. Данные значения оценочных параметров для 1-го ряда несущественно меняются при переходе к последующим рядам пальцев. Следовательно, такое скользящее движение частицы по поверхности пальца не может приводить к существенным локальным температурам на фрикционном контакте.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Рассмотрим соответствие полученных результатов упругой модели Герца для соударения частиц (радиус $R = 5 \cdot 10^{-6}$ см) с пальцами дезинтегратора (табл. 4). Во-первых, времена ударного τ_i и фрикционного τ'_i взаимодействия имеют порядок 10^{-8} с: τ_i уменьшаются не более чем в 1.6 раза, согласно (2), с увеличением w (табл. 2); τ'_i определяются исходными положениями [12]. Все остальные характеристики соударений существенно растут. В частности, отношение деформации к диаметру частицы $\varepsilon_i / 2R$ находится в интервале $0.013(\varepsilon_1, \text{ кварц}) - 0.17(\varepsilon_4, \text{ сера})$ или $1.3 - 17\%$, что на порядки превышает допустимые упругие деформации для кристаллов, которые составляют десятые доли процента [24]. Поэтому при соударениях частицы с пальцами для высоких оборотов роторов наблюдаются значительные остаточные деформации. Определим, например, для частиц кварца интервал скоростей Δw^* , при которых отношение $\Delta(\varepsilon^* / 2R)$ будет находиться в пределах $0.1 - 0.9\%$. Для максимальных выходных значений w_4^* из формул (6) получаем: $\Delta(\varepsilon_4^* / 2R) = 0.5 \rho^{0.4} \theta (\theta + \underline{\theta})^{-0.6} (\Delta w_4^*)^{0.8} = k (\Delta w_4^*)^{0.8}$; $(\Delta w_4^*)^{0.8} = \Delta(\varepsilon_4^* / 2Rk)$ или $\Delta w_4^* = [\Delta(\varepsilon_4^* / 2Rk)]^{1.25}$, где $k = 6.65 \cdot 10^{-4} [\text{с/м}]^{0.8}$. Находим: $\Delta w_4^*(0.1 - 0.9\%) = 1.7 - 26$ м/с или, согласно $w \sim \omega$ [12], интервал $\Delta \omega^* = 40 - 620$ об/мин = $0.67 \div 10.3 \text{ с}^{-1}$. Для галита и серы эти значения будут еще меньше, например для серы: $\Delta w_4^*(0.1 - 0.9\%) = 0.7 - 11$ м/с; $\Delta \omega^* = 20 - 300$ об/мин = $0.33 \div 5.0 \text{ с}^{-1}$. Полученный результат по Δw^* находится в полном соответствии с экспериментом [14, 23], а по $\Delta \omega^*$ — практически нереализуем (рабочие частоты оборотов ротора дезинтегратора $\omega > 500$ об/мин = 8.3 с^{-1}). Итак, можно констатировать, что упругая модель соударений частиц по теории Герца в дезинтеграторе принципиально невозможна, а имеет место кинематика и динамика упругопластических и неупругих соударений.

Моделирование соударения частиц с пальцами дезинтегратора проведено при исключении возможности ее разрушения (на входе и выходе мы имели частицу с массой m). Однако известно [24], что разрушение кристаллов происходит тогда, когда внешние напряжения σ окажутся достаточными для разрыва связей между атомами ($\sim 0.1E$). Напряжение σ порядка одной десятой модуля Юнга называется теоретической прочностью твердого тела. В нашем случае при $\omega = 1047$ рад/с имеем (табл. 3, 4) для α -кварца $\Delta(\sigma_1 / E) = 0.11 - 0.28$, галита — $0.13 - 0.33$, α -серы — $0.16 - 0.41$. В большинстве случаев механическое разрушение происходит при напряжении, много меньшем теоретической прочности. Прочность кварца (одного из самых упругих веществ) близка к теоретическому значению $\sigma / E = 0.10 - 0.25$ [24], а для плавленого кварца — 0.19 [25]. Применительно к галиту разрушение кристалла NaCl отмечается при $\sigma / E = 0.026$ [24, 26]. Таким образом, приходим к выводу, что в любом рабочем режиме оборотов дезинтегратора будет происходить высокоскоростное измельчение частиц. Более того, при разрушении в носке магистральных трещин реализуются также и фразктэмиссионные явления [10]. Поэтому процесс разрушения в дезинтеграторе, так же как явления трения, упругопластической деформации и дефектообразования, играет доминирующую роль в процессе МА минералов.

Из табл. 4 видно, что расчетные значения локальных температур ΔT по нелинейно-упругой модели соударений частиц составляют сотни градусов, что значительно превышает температуру плавления $\alpha - S$, равную 113°C . Как показано в [17, 27], в таких случаях температура на ударно-фрикционном контакте ΔT ограничивается контактной температурой плавления, которая не превышает 113°C . Подходы упругопластической динамики по формуле (9) исключают возможность контактного плавления частиц $\alpha - S$ и только по (8) допускают ее, так как $\Delta T_4^* = 200\text{ K}$. Рассчитаем скорость частиц V_4^* , когда $\Delta T_4^* < 113^\circ\text{C}$, по (8) будет равна 100 K , что из-за линейной зависимости $V(\omega)$ заведомо исключит возможность плавления серы. Тогда, согласно табл. 2, $\Delta T_4^* = [(V_4^*/8.3)^2 + (V_4^*/2.8)^2 + (V_4^*/1.5)^2 + (V_4^*)^2] / 2c = 1.6(V_4^*)^2 / 2c = 100\text{ K}$ или $V_4^* = 94\text{ м/с}$, что соответствует $\omega^* = 230\text{ рад/с} = 2200\text{ об/мин}$.

Таким образом, оптимальными условиями для МА частиц серы можно считать “мягкие” частоты $\omega \sim 2000\text{ об/мин} = 33.3\text{ с}^{-1}$, которые исключают возможность контактного плавления и явления комкования серы, как это бывает в высокоэнергетических шаровых мельницах, при сохранении остальных преимуществ. Это делает дезинтегратор перспективным устройством для предварительной МА частиц серы для последующих технологических операций, таких как синтез полисульфидов аммония, щелочных и щелочноземельных металлов, которые имеют широкий спектр применений при обогащении минерального сырья и получении наночастиц серы [28].

Однако самым практически значимым результатом должно быть определение оптимальных условий раскрытия минеральных сростков, а также проведение структурно-химических объемных и поверхностных изменений целевых минералов в процессе обработки минерального и техногенного сырья в дезинтеграторе для увеличения степени их обогащения. Из полученных оценок следует, что обработка частиц в дезинтеграторе обладает колоссальным запасом по частотам ω вращения корзин для осуществления любых видов механической модификации геоматериалов, в том числе и селективного измельчения по границам минеральных зерен. Так как свойства геоматериалов варьируют в широких диапазонах, то определение таких частот ω их обработки, при которых происходит освобождение целевых минералов с получением оптимальных размеров для их дальнейшего передела, возможно только эмпирически. Определение оптимальных частот вращения корзин дезинтегратора для различных видов геоматериалов будет давать экономический эффект, поскольку повысится степень их обогащения и снизятся энергозатраты.

ВЫВОДЫ

Теоретическими оценками установлены механические и теплофизические параметры обработки в дезинтеграторе частиц минерального и техногенного сырья для определения условий раскрытия минеральных сростков. В частности, проведено численное моделирование механической обработки частиц галита, кварца и серы с целью определения оптимальных параметров их активации для последующих технологических операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юсупов Т. С. Совершенствование процессов раскрытия минеральных сростков как путь к освоению труднообогатимых рудных объектов // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 143–149.
2. Юсупов Т. С., Бакшеева И. И., Ростовцев В. И. Исследование влияния различных видов механических воздействий на селективность разрушения минеральных ассоциаций // ФТПРПИ. — 2015. — № 6. — С. 182–188.
3. Юсупов Т. С., Уракаев Ф. Х., Исупов В. П. Прогноз структурно-химических изменений минералов при механических воздействиях в процессах измельчения // ФТПРПИ. — 2015. — № 5. — С. 161–168.
4. Юсупов Т. С. Управление структурной дефектностью минералов как путь совершенствования флотационного обогащения руд // Экология и развитие общества. — 2015. — № 3(14). — С. 31–37.

5. **Правдина М. Х.** Вихревая мельница для измельчения хрупких и пластичных материалов // Гольдштик М. А. Процессы переноса в зернистом слое. — 2-е изд. — Новосибирск: ИТ СО РАН, 2005. — Прил. 2. — С. 315–358.
6. **Шевченко В. С., Лаптев Ю. В., Шестакова Р. Д., Колонин Г. Р., Петрушин Е. И., Савинцев Ю. П., Юсупов Т. С., Уракаев Ф. Х.** Влияние активационного измельчения в дезинтеграторе на процессы вскрытия и обогащения валлериитсодержащей руды Талнахского месторождения // Химия в интересах устойчивого развития. — 2007. — Т. 15. — № 2-1 (Приложение). — С. 215–223.
7. **Laptev Yu. V., Shevchenko V. S., Urakaev F. Kh.** Sulphidation of valleriite in SO₂ solutions, Hydrometallurgy, 2009, Vol. 98, Iss. 3-4. — P. 201–205.
8. **Bowden F. P., Persson P. A.** Deformation, heating and melting of solids in high-speed friction, Proc. Roy. Soc. Lond. A., 1961, Vol. 260, No. 1303. — P. 433–458.
9. **Клейс И. Р., Ууэмыйс Х. Х.** Износостойкость элементов измельчителей ударного действия. — М.: Машиностроение, 1986. — 160 с.
10. **Urakaev F. Kh.** Mechanodestruction of minerals at the crack tip (Overview): 1. Experiment, Physics and Chemistry of Minerals, 2007, Vol. 34, No. 5. — P. 351–361.
11. **Планиоль Р.** Центробежная мельница, работающая под вакуумом // Труды европейского совещ. по измельчению. — М.: Стройиздат, 1966. — С. 473–483.
12. **Уракаев Ф. Х., Жогин И. Л., Гольдберг Е. Л.** Описание процесса обработки частиц в дезинтеграторе // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. — 1985. — № 8. — Вып. 3. — С. 124–131.
13. **Жогин И. Л., Уракаев Ф. Х.** Описание движения частиц в дезинтеграторе // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. — 1985. — № 11. — Вып. 4. — С. 129–132.
14. **Гольдсмит В.** Удар. — М.: Госстройиздат, 1965. — 447 с.
15. **Пановко Я. Г.** Введение в теорию механического удара. — М.: Наука, 1977. — 244 с.
16. **Раус Э. Дж.** Динамика системы твердых тел. Т. 1 / пер. с англ. Ю. А. Архангельского и В. Г. Демина. — М.: Наука, 1983. — 464 с.
17. **Urakaev F. Kh.** Mechanism and kinetics of mechanochemical processes, High-energy ball milling: mechanochemical processing of nanopowders M. Sopicka-Lizer (Editor), Oxford-Cambridge-New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2010, Chapter 2. — P. 9–44.
18. **Urakaev F. Kh., Boldyrev V. V.** Mechanism and kinetics of mechanochemical processes in comminuting devices. 1. Theory, Powder Technology, 2000, Vol. 107, Iss. 1–2. — P. 93–107.
19. **Капитонов А. М., Редькин В. Е.** Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства. — Красноярск: СФУ, 2013. — 531 с.
20. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. — М.: Высш. шк. 1967. — С. 599.
21. **Андерсон О.** Определение и некоторые применения изотропных упругих постоянных поликристаллических систем, полученных из данных для монокристаллов. Т. 3 // Динамика решетки. Физическая акустика / под. ред. У. Мэзона. — М.: Мир, 1968. — С. 62–121.
22. **Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П.** Оптические материалы для инфракрасной техники: справ. изд. — М.: Наука, 1965. — 337 с.
23. **Батуев Г. С., Голубков Ю. В., Ефремов А. К., Федосов А. А.** Инженерные методы исследования ударных процессов. — М.: Машиностроение, 1969. — 248 с.
24. **Шувалов Л. А., Урусовская А. А., Желудев И. С. и др.** Механические свойства кристаллов // Современная кристаллография. Т. 4: Физические свойства кристаллов / под ред. Б. К. Вайнштейна, А. А. Чернова, Л. А. Шувалова. — М.: Наука, 1981. — С. 47–152.
25. **Hillig W. V.** Strength of bulk fused quartz, Journal of Applied Physics, 1961, Vol. 32, Iss. 4. — P. 741.
26. **Gyulai Z.** Festigkeits- und Plastizitätseigenschaften von NaCl-Nadelkristallen, Zeitschrift für Physik, 1954, Vol. 138, Iss. 3-4. — P. 317–321.
27. **Urakaev F. Kh., Boldyrev V. V.** Mechanism and kinetics of mechanochemical processes in comminuting devices. 2. Applications of the theory. Experiment, Powder Technology, 2000, Vol. 107, Iss. 3. — P. 197–206.
28. **Уракаев Ф. Х., Булавченко А. И., Уралбеков Б. М., Массалимов И. А., Татыкаев Б. Б., Болатов А. К., Джарлыкасимова Д. Н., Буркитбаев М. М.** Механохимический синтез коллоидных частиц серы в системе Na₂S₂O₃–H₂(C₄H₄O₄)–Na₂SO₃ // Коллоид. журн. — 2016. — Т. 78. — № 2. — С. 193–202.

Поступила в редакцию 11/1 2016