

## Моделирование активационного измельчения частиц ромбической серы в дезинтеграторе

<sup>1</sup>Уракаев Ф.Х., <sup>2</sup>Массалимов И.А.,  
<sup>1</sup>Юсупов Т.С., <sup>3</sup>Уралбеков Б.М.\*,  
<sup>3</sup>Татыкаев Б.Б., <sup>3</sup>Галиева П.А.,  
<sup>3</sup>Кетеменов Т.А., <sup>3</sup>Буркитбаев М.М.

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии  
им. В.С. Соболева СО РАН,  
Новосибирск, Россия  
<sup>2</sup>Башкирский государственный  
университет, Уфа, Башкортостан, Россия  
<sup>3</sup>Казахский национальный университет  
им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан  
\*E-mail: bulat.ural@gmail.com

На основе теоретических исследований дана целостная картина механической обработки серы в дезинтеграторе. Рассчитаны кинематические и динамические характеристики упругих и неупругих соударений обрабатываемых частиц ромбической серы с рядами пальцев дезинтегратора. На основе анализа полученных зависимостей от частоты вращения роторов даны рекомендации по выбору оптимальных условий активационного измельчения  $\alpha$ -серы в дезинтеграторе. Полученные результаты могут быть частично использованы при обработке серы и в других типах ударных измельчительных устройств, в частности струйных вихревых мельницах.

**Ключевые слова:** дезинтегратор; сера; активационное измельчение; кинематика и динамика; расчет.

---

## Simulation of activational grinding for rhombic sulfur particles in a disintegrator (pinned disc mill)

<sup>1</sup>Urakaev F.Kh., <sup>2</sup>Massalimov I.A.,  
<sup>1</sup>Yusupov T.S., <sup>3</sup>Uralbekov B.M.\*,  
<sup>3</sup>Tatykayev B.B., <sup>3</sup>Galiyeva P.A.,  
<sup>3</sup>Ketegenov T.A., <sup>3</sup>Burkitbayev M.M.

<sup>1</sup>V.S. Sobolev Institute of Geology and  
Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia  
<sup>2</sup>Bashkortostan State University, Ufa,  
Bashkortostan, Russia  
<sup>3</sup>Al-Farabi Kazakh National University,  
Almaty, Kazakhstan  
\*E-mail: bulat.ural@gmail.com

Based on the theoretical studies, complete picture of a mechanical processing of sulfur in the disintegrator is given. Kinematic and dynamic characteristics of elastic and inelastic collisions of particles of processed rhombic sulfur with rows of disintegrator fingers are calculated. Based on the analysis of the obtained dependency of the rotation frequency of the rotors offers, advices on selecting optimal conditions for activation milling of  $\alpha$ -sulfur in the disintegrator are given. These results can be partially used in the processing of sulfur and in other types of shock grinding devices, in particular, jet mills.

**Keywords:** disintegrator; sulphur; mechanical activation; kinematics and dynamics; simulation.

---

## Ромбальқ күкірт бөлшектерінің дезинтегратордағы активациялық ұсақталуын үлгілеу

<sup>1</sup>Уракаев Ф.Х., <sup>2</sup>Массалимов И.А.,  
<sup>1</sup>Юсупов Т.С., <sup>3</sup>Уралбеков Б.М.\*,  
<sup>3</sup>Татыкаев Б.Б., <sup>3</sup>Галиева П.А.,  
<sup>3</sup>Кетеменов Т.А., <sup>3</sup>Бүркітбаев М.М.

<sup>1</sup>РФА СБ В.С. Соболев атындағы  
геология және минералогия институты,  
Новосибирск, Ресей  
<sup>2</sup>Башкирия мемлекеттік университеті, Уфа,  
Башқұртыстан, Ресей  
<sup>3</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық  
университеті, Алматы, Қазақстан  
\*E-mail: bulat.ural@gmail.com

Теориялық зерттеулердің негізінде дезинтегратордағы күкірттің механикалық өңдеудің біртұтас көрінісі келтірілген. Дезинтегратордың саусақ қатарларымен өңделетін ромбальқ күкірт бөлшектердің серпінді және серпінсіз соқтығыстардың кинематикалық және динамикалық сипаттамалары есептелді. Роторлардың айналу жиілігіне тұтас байланысты алынған тәуелділіктерді талдау негізінде дезинтеграторда  $\alpha$ -күкіртті активациялық ұсақтудың тиімді жағдайларын таңдау бойынша ұсыныстар берілді. Алынған нәтижелер күкіртті өңдеу кезінде және басқа да соқпа ұсақтағыш құрылғылардың түрлерінде, соның ішінде қарқынды құйын тәрізді диірмендерде жарым-жартылай қолданылуы мүмкін

**Түйін сөздер:** дезинтегратор; күкірт; активациялық ұсақтау; кинематика және динамика; есеп.



## Моделирование активационного измельчения частиц ромбической серы в дезинтеграторе

<sup>1</sup>Уракаев Ф.Х., <sup>2</sup>Массалимов И.А., <sup>1</sup>Юсупов Т.С., <sup>3</sup>Уралбеков Б.М. \*,  
<sup>3</sup>Татыкаев Б.Б., <sup>3</sup>Галиева П.А., <sup>3</sup>Кетегенов Т.А., <sup>3</sup>Буркитбаев М.М.

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Башкирский государственный университет, Уфа, Башкортостан, Россия

<sup>3</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

\*E-mail: bulat.ural@gmail.com

### 1. Введение

В недавних публикациях [1-3] был рассмотрен обширный комплекс действий и проблем, посвященных такому селективному разрушению минеральных ассоциаций, которое бы в наибольшей степени способствовало 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. Проведенные в [1-3] 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» имеет место при взаимодействии частицы с неподвижной стенкой струйной вихревой мельницы [4] или с пальцами дезинтегратора [5,6].

С другой стороны ранее нами были рассмотрены возможности применения методов механохимии для получения нанокомпозитов [7] и наночастиц (галогенидов серебра [8,9] и серы [10,11]). Более того в [12,13] было показано, что предварительная механическая активация (МА) серы является необходимой технологической стадией при получении концентрированных растворов полисульфидов и наносеры для их дальнейшего использования в сельском хозяйстве [14] и строительстве [15].

В настоящей работе рассматриваются теоретические и практические аспекты обработки частиц серы в дезинтеграторе. Физико-химические процессы, протекающие при обработке веществ в дезинтеграторе, могут быть обусловлены одновременным действием на ударно-фрикционном контакте локальных импульсов температуры и давления, и, как следствие, деформацией, разрушением и плавлением частиц [16-18], включая сопутствующие фрактоэмиссионные явления [19].

Однако для оценки роли этих явлений в понимании возможностей дезинтегратора в аспекте МА серы необходимо знание кинематических (траектории и скорости движения МА частиц) и динамических (нормальные и сдвиговые контактные силы) характеристик ее обработки в дезинтеграторе.

Из-за трудностей учета аэродинамических условий при работе на обычных ударно-центробежных мельницах, в том числе лабораторных и/или промышленных дезинтеграторах (оценки показывают, что для исключения этих условий достаточно иметь давление воздуха в дезинтеграторе ~0,1 мм рт. ст.), корректный расчет названных параметров возможен только для вакуумируемых устройств [20].

Численные оценки характеристик обработки серы в дезинтеграторе выполнены в зависимости от геометрических параметров и угловых скоростей вращения корзин для трех разновидностей взаимодействий: упругих; упругопластических; и пластических.

### 2. Эксперимент

*Кинематика упругих и неупругих соударений*

Рассмотрим конкретный вакуумируемый 4-рядный

(пальцы из твердого сплава ВК8) дезинтегратор I50A производства СКТБ «Дезинтегратор» (Эстония, г. Таллин), эксплуатируемый авторами с 1986 года [21]. Его схематический чертеж (представлены только направляющая поверхность дозируемых частиц и первые ряды пальцев вращающихся корзин с равно оппозитно угловыми скоростями роторов электродвигателей  $|\omega_1| = |\omega_2| = |\omega|$ ) с указанием всех необходимых для расчета параметров представлен на рисунке 1.

Центр координат поместим на ось вращения дезинтегратора и пусть  $l$  – радиальная переменная. Введем понятие фазового угла  $\varphi(l)$ . Это угол, составленный точкой основания ближайшего слева (справа) пальца и точкой прилета МА механически обрабатываемой (механически активируемой, МА) частицы на окружность, описываемую точкой основания этого пальца. Очевидно, этот палец дезинтегратора может соударяться с данной частицей на расстоянии  $l$  от центра только в том случае, если  $0 \leq \varphi(l) \leq 2\pi/n$ , где  $n$  – число пальцев на рассматриваемом ряде ротора дезинтегратора. Поскольку траектория и время движения частицы

в дезинтеграторе определяются ее скоростью  $v$  и прицельным параметром  $a$  относительно центра, то и задача сводится к вычислению значений  $a = a(\varphi) = a(l)$  и  $v = v(\varphi) = v(l)$  до и после соударения частицы с пальцем ротора. Необходимо отметить, что начальные значения  $a_0$  и  $v_0$  должны быть заданы. Мы оценили их значения исходя из конструкции и действия дезинтегратора: МА частицы поступают в дезинтегратор из дозатора на вращающуюся с угловой скоростью  $\omega$  направляющую поверхность радиусом  $a_0$  (принято за исходное значение прицельного параметра) через чередующиеся отверстия (форсунки) так, что частицы движутся затем по касательной к этой поверхности с начальной скоростью, равной линейной скорости точки этой поверхности  $v_0 = a_0\omega$ .

Очевидно, что для нас наибольший интерес представляют относительная скорость соударения частицы с плоской поверхностью пальца  $V_1 = w_1 + u_1$  и послеударные значения  $v_1$  и  $a_1$  частицы, где  $w_1$  и  $u_1$  – нормальная и тангенциальная компоненты вектора  $V_1$  относительно плоской поверхности пальца. Если принять, что соударение частицы с первым рядом пальцев происходит в точке  $l_1$  (рисунок 1), то будем иметь:

$$\varphi(l_1) = \omega t_1 - \psi_1 = [(l_1^2 - a_0^2)^{0.5} - (l_0^2 - a_0^2)^{0.5}] (\omega/v_0) - \psi_1 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Gamma w_1 &= a_0\omega \sin(\arcsin a_0/l_1 - \alpha_1') - l_1\omega \cos \alpha_1' = A_1\omega \\ \dagger u_1 &= a_0\omega \cos(\arcsin a_0/l_1 - \alpha_1') - l_1\omega \sin \alpha_1' = B_1\omega \\ \text{L } V_1^2 &= w_1^2 + u_1^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Gamma v_{1w} &= (1+\gamma_1)l_1\omega \cos \alpha_1' - \gamma_1 a_0\omega \sin(\arcsin a_0/l_1 - \alpha_1') \\ \dagger v_{1u} &= a_0\omega \cos(\arcsin a_0/l_1 - \alpha_1') - \xi_1(1+\gamma_1)l_1\omega \cos \alpha_1' - a_0\omega \sin(\arcsin a_0/l_1 - \alpha_1') \\ \text{L } v_1^2 &= v_{1w}^2 + v_{1u}^2; \quad a_1 = l_1 \sin(\alpha_1' + \arctg v_{1w}/v_{1u}) \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь:  $t_1$  – время полета частицы от точки окружности с радиусом  $l_{10}$  до соударения с поверхностью пальца в точке  $l_1$ ;  $\psi_1 = \arcsin a_0/l_{10} - \arcsin a_0/l_1 - \alpha_1 + \alpha_1'$ , где  $\alpha_1$  – угловой размер первого ряда пальцев в радиальном направлении;  $\alpha_1' = \arcsin(l_{10} \sin \alpha_1/l_1)$  – угловой размер пальцев от точки соударения. Углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_1'$  определяются геометрией пластин. Индексы  $w$  и  $u$  обозначают, соответственно, нормальную и тангенциальную составляющие скорости  $v$  относительно поверхности пальца,  $\gamma$  – коэффициент восстановления Ньютона, а  $\xi$  – динамический коэффициент трения [22,23]. Из формулы (2), где  $A_1$  и  $B_1$  константы первого ряда пальцев для зависимости от  $\omega$  наиболее значимых для последующих расчетов величин  $w_1$  и  $u_1$ . То же справедливо и для (3), (4) и (6)-(8).

Формулы (2, 3) выведены для задачи косоугольного удара при

допущении: (i) масса пальца много больше массы частицы, что не вызывает сомнения; (ii) действия « $\zeta$ -гипотезы» Рауса [24,25], описывающей соударения с большими относительными скоростями, причем область определения одной из формул описывается неравенством  $u_1' \geq 0$ , где  $u_1'$  – послеударное значение  $u_1$ . Это ому удовлетворяет следующее неравенство:

$$\xi_1(1+\gamma_1) \leq \frac{a_0\omega \cos(\arcsin a_0/l_1 + \alpha_1') - l_1\omega \sin \alpha_1'}{l_1\omega \cos \alpha_1' - a_0\omega \sin(\arcsin a_0/l_1 + \alpha_1')} = \frac{u_1}{w_1} \quad (4)$$

противном случае  $u_1' \equiv 0$ .

Формулы, аналогичные (1)-(4), получаем для соударения частицы и с последующими рядами пальцев ( $i = 2, 3, 4$ ):

$$\begin{aligned} \Gamma \varphi(l_i) &= [(l_i^2 - a_{i-1}^2)^{0.5} - (l_{i-1}^2 - a_{i-1}^2)^{0.5}] (\omega/v_{i-1}) + \psi_i \\ \dagger \psi_i &= \arcsin a_{i-1}/l_{i-1} - \arcsin a_{i-1}/l_i + \alpha_i - \alpha_i' \\ \text{L } \alpha_i' &= \arcsin(l_{i-1} \sin \alpha_i/l_i) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Gamma w_i &= v_{i-1} \sin(\arcsin a_{i-1}/l_i + \alpha_i') + l_i\omega \cos \alpha_i' = A_i\omega \\ \dagger u_i &= v_{i-1} \cos(\arcsin a_{i-1}/l_i + \alpha_i') - l_i\omega \sin \alpha_i' = B_i\omega \\ \text{L } V_i^2 &= w_i^2 + u_i^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Gamma v_{iw} &= (-1)^{i-1} [(1+\gamma_i)l_i\omega \cos \alpha_i' + \gamma_i v_{i-1} \sin(\arcsin a_{i-1}/l_i - \alpha_i')] \\ \dagger v_{iu} &= v_{i-1} \cos(\arcsin a_{i-1}/l_i - \alpha_i') - \xi_i(1+\gamma_i)l_i\omega \cos \alpha_i' + v_{i-1} \sin(\arcsin a_{i-1}/l_i + \alpha_i') \\ \text{L } v_i^2 &= v_{iw}^2 + v_{iu}^2; \quad a_i = l_i \sin(\alpha_i' + \arctg v_{iw}/v_{iu}) \end{aligned} \quad (7)$$

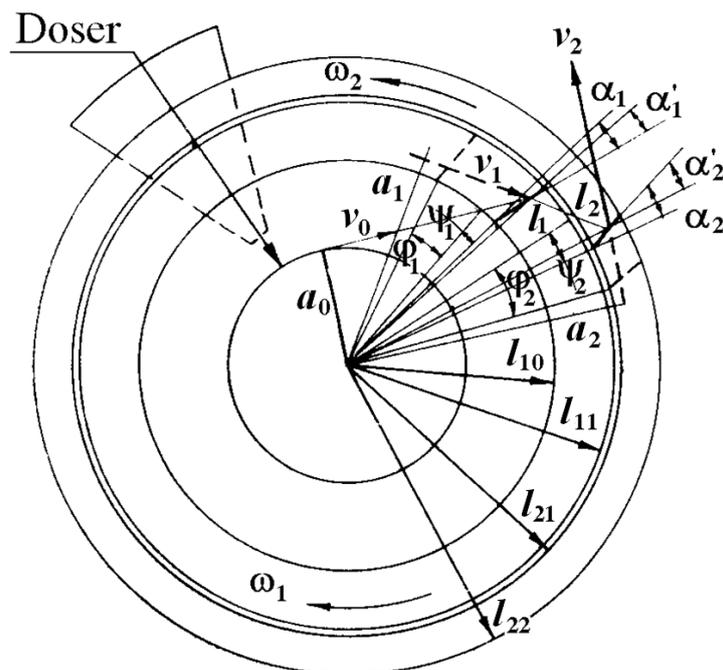


Рисунок 1 – Схема движения частицы обрабатываемого вещества в дезинтеграторе

$$\xi_i(1+\gamma) \leq \frac{v_{i-1} \cos(\arcsin a_{i-1}/l_i + \alpha'_i) - l_i \omega \sin \alpha'_i}{l_i \omega \cos \alpha'_i - v_{i-1} \sin(\arcsin a_{i-1}/l_i + \alpha'_i)} = \frac{u_i}{w_i} \quad (8)$$

Как и в (4), при противоречащем неравенству (8) случае  $u'_i \equiv 0$ .

Для численных оценок будем полагать, что исходные квазисферические частицы молотой (коллоидной, смотрите: [www.ntds.ru/dogovora/Vidi\\_sernoy\\_produkcii.doc](http://www.ntds.ru/dogovora/Vidi_sernoy_produkcii.doc)) серы с диаметром  $2R = 0,001\text{см}$  (много меньше диаметра  $0,2\text{см}$  отверстий форсунок) без разрушения соударяются с пальцами дезинтегратора в точках  $l_i = l_{i0}$ . Такой выбор соответствует максимальному значению фазового угла  $\varphi(l_i) = \varphi(l_{i0}) = \varphi_m$ . В таблице 1 даны численные значения исходных параметров для расчета кинематики соударений.

Начнем с анализа физического смысла неравенства (4). Знак равенства в нем указывает на обращение в нуль касательной составляющей послеударного значения скорости частицы относительно пальца 1-го ряда ( $u'_1 = 0$ ) и совпадение времен нормального (ударного,  $\tau$ ) и тангенциального (фрикционного,  $\tau'$ ) взаимодействия ( $\tau_1 = \tau'_1$ ). Если неравенство (4) соблюдается, то послеударная скорость  $u'_1 > 0$ , а  $\tau_1 \equiv \tau'_1$ . Если же нарушается, то  $u'_1 \equiv 0$ , а  $\tau_1 > \tau'_1$ . Знак равенства в (4) имеет место только при некотором критическом значении динамического коэффициента трения  $\xi = \xi_1 = u_1 / (1+\gamma) w_1$ . В расчетах по (1)-(8) также очевидно, что природа частиц учитывается только значениями величин  $\gamma$  и  $\xi$ , поэтому они справедливы для любого рода частиц.

Согласно упругим моделям соударений [22-25], мы обязаны рассматривать удары только с единичным коэффициентом восстановления Ньютона:  $\gamma = 1$ . Этому со-

ответствует значение  $\xi_1 = u_1 / 2w_1$ . Поскольку значение  $\xi$  в общем случае неизвестно и может быть определено только опытным путем или же в исключительных случаях расчетом [24], то в качестве его стартового значения примем величину  $\xi = \xi_1$ , а для его последующих значений величины  $\xi_i = u_i / 2w_i$ . В таблице 2 обобщены результаты проведенных вычислений по формулам (1)-(8).

Выше мы полагали  $\gamma = 1$ . Очевидно, при абсолютно неупругом соударении ( $\gamma = 0$ ) в зависимости от значения  $\xi$  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)-(8) с учетом  $\gamma = 0$ . Модель удара (закон Герстнера), промежуточная между неупругими и упругими взаимодействиями не приводит к существенным поправкам и не меняет физической сущности явлений, смотрите ниже следующий Раздел.

Расчет кинематики неупругого соударения проведем при допущении, что частица серы ударяется в точку  $l_i$  пальца  $i$ -го ряда (при численных оценках положим  $l_i = l_{i,i-1}$ ), останавливается, затем движется в течение времени  $t = \underline{t}$  по поверхности пальца на периферию и вылетает из точки  $l = l_{i0}$ . Эта модель действительна, если  $\gamma \equiv 0$ , а время неупругого взаимодействия много меньше времени последующего движения частицы серы вдоль пальца. Уравнения движения во вращающейся системе координат с центром на оси дезинтегратора (ось  $y$  перпендикулярна, а ось  $x$  радиально параллельна поверхности пальца) имеют вид [24]:

$$x'' = \omega^2 x - 2\omega y' - f_y \xi / m; \quad y'' = \omega^2 y + 2\omega x' - f_x / m \quad (9)$$

**Таблица 1** – Необходимые геометрические величины для расчета кинематики соударений частиц обрабатываемых веществ с пальцами дезинтегратора в стабильном интервале частот оппозитного вращения  $\omega=500\div 10000$  оборотов в минуту<sup>#</sup> роторов

Номер индекса, $i$	Число пальцев, $n$	$l_{i-1}$ , см	$l_{ii}$ , см	$\phi_m$ , градус
0	-	2,5	-	-
1	6 (23*)	4,4	5,2	16
2	12 (17*)	5,6	6,2	21
3	16 (23*)	6,5	7,1	16
4	18 (36*)	7,4	7,8	10

**Таблица 2** – Кинематика ударной обработки частицы серы в дезинтеграторе при частоте оппозитного вращения корзин  $\omega = 10000$  об / мин = 1047 рад / с

Номер индекса, $i$	$\xi$	$w$ , см/с	$u$ , см/с	$V$ , см/с	$v$ , см/с	$a$ , см
0	-	-	-	-	2600	2,5
1	0,274	4200	2300	4800	9600	5,2
2	0,055	15000	1700	15100	2200	6,1
3	0,081	28000	4500	28400	3500	7,0
4	0,066	42000	5600	42400	50000	7,6

где " и ' - вторая и первая производные;  $f_y$  - сила реакции пальца;  $m$  - масса идеализированной частицы. Условие  $y'' = 0$  ( $y' = 0$ ) при  $y = y_0 = l_{i-1} \sin \alpha_i$  определяет  $f_y$ :

$$f_y/m = \omega^2 y_0 + 2\omega x' \quad (9a)$$

Тогда для движения частицы вдоль пальца имеем уравнение:

$$x'' + 2\xi\omega x' - 2\omega(x - \xi y_0) = 0 \quad (10)$$

а условие  $x_0 = l_i \cos \alpha'_i > \xi y_0$  при  $l_i = l_{i-1}$  совпадает с условием  $\xi < \text{ctg } \alpha_i$ .

Введя  $\chi = x - \xi y_0$ , получаем решение (10) в следующем виде:

$$\chi(t) = C \exp(\mu_1 t) + D \exp(\mu_2 t) \quad (11)$$

где  $\mu_1 = \omega [(\xi^2 + 1)^{0.5} - \xi]$ ,  $\mu_2 = -\omega [(\xi^2 + 1)^{0.5} + \xi]$ .

Постоянные величины  $C$  и  $D$  в (11) определяются по начальным данным:

$$\chi(0) = C + D = x_0 - \xi y_0; C = (x_0 - \xi y_0) [(\xi^2 + 1)^{0.5} + \xi] / 2(\xi^2 + 1)^{0.5}$$

или

$$\chi'(0) = \mu_1 C + \mu_2 D = 0; D = (x_0 - \xi y_0) [(\xi^2 + 1)^{0.5} - \xi] / 2(\xi^2 + 1)^{0.5} \quad (12)$$

Скорость  $\underline{u}_i$  и время  $\underline{t}_i$  вылета частицы определяются условиями:

$$\begin{aligned} \chi'(\underline{t}_i) = x'_i = \underline{u}_i = \mu_1 C \exp(\mu_1 \underline{t}_i) + \mu_2 D \exp(\mu_2 \underline{t}_i); \\ \chi(\underline{t}_i) = x_i = \underline{u}_i = \mu_1 C \exp(\mu_1 \underline{t}_i) + \mu_2 D \exp(\mu_2 \underline{t}_i); \end{aligned} \quad (13)$$

где  $x_i = l_{ii} \cos \alpha'_i$ , а  $\underline{t}_i$  можно определить следующими итерациями:

$$\begin{aligned} \underline{t}_{i,0} = \mu_1^{-1} \ln(x_i - \xi y_0)/C; \\ \underline{t}_{i,1} = \mu_1^{-1} \ln(x_i - \xi y_0 - D \exp(\mu_2 \underline{t}_{i,0})/C \end{aligned} \quad (14)$$

Скорость вылета ( $v_i$ ) и прицельный параметр ( $\underline{a}_i$ ) частицы в лабораторной системе координат будут:

$$\begin{aligned} v_i^2 = u_i^2 + \omega^2 l_{ii}^2 + 2\underline{u}_i \omega l_{ii} \sin \alpha'_i; \\ \underline{a}_i = l_{ii} \sin[\alpha'_i + \arccos(v_i^2 + \underline{u}_i^2 - \omega^2 l_{ii}^2) / 2v_i \underline{u}_i] \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь также будет уместно привести и выражение для выделяющегося тепла ( $Q$ ) и роста температуры ( $\Delta T$ ) частицы при ее скольжении вдоль поверхности пальца:

$$Q_i = m [\omega^2 (x_i^2 - x_0^2) + u_i^2] / 2; \Delta T_i = Q_i / s_i \text{ iErfc}[0] / s_i (\lambda \rho c \underline{t}_i)^{0.5} \quad (16)$$

где  $s_i = \pi r_i^2 = \pi R^2 \rho^{0.4} (\vartheta + \underline{v})^{0.4} w_i^{0.8}$  - остаточная площадь контакта частицы после неупругого удара, смотрите ниже формулы (18) и (22).

При вычислениях по формулам (9)-(16) и ниже для частицы ромбической серы ( $\alpha$ -S) принято [25-29]:  $\rho = 2,07 \text{ г/см}^3$  - плотность;  $\lambda(300\text{K}) = 2,7 \cdot 10^4 \text{ эрг/(см}\cdot\text{K}\cdot\text{с)}$  - теплопроводность;  $c(300\text{K}) = 7,1 \cdot 10^6 \text{ эрг/(г}\cdot\text{K)}$  - удельная теплоемкость;  $\zeta = \lambda/\rho c = 0,0018 \text{ см}^2/\text{с}$ ; масса  $m$  при радиусе  $R = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$  равна  $m = 4\pi R^3 \rho/3 = 1,1 \cdot 10^{-9} \text{ г}$ ;  $E = 1,8 \cdot 10^{11} \text{ дин/см}^2$ ;  $\nu = 0,342$ ;  $\theta = 2,0 \cdot 10^{-11} \text{ см}^2/\text{дин}$ ;  $\underline{\theta} = 0,85 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин}$ .

Для взаимодействия частицы серы с первым рядом пальцев оценки при  $\omega = 1047 \text{ рад/с}$ , дают следующие значения:  $\underline{t}_1 = 6,0 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ;  $\underline{u}_1 = 2600 \text{ см/с}$ ;  $f_{y1} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ дин}$ ;  $Q_1 = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ эрг}$ ;  $\Delta T_1 = 30 \text{ К}$ . Данные значения параметров существенно меняются при переходе к последующим рядам пальцев. Значения же  $\underline{u}_1$  по (15) приблизительно равны таковым по (3) и (7), см. таблицу 2. Следовательно, такое движение не может приводить к существенным локальным температурам на фрикционном контакте.

#### Динамика упругих и неупругих соударений

Для изучения динамики ударных процессов наиболее широко используется нелинейно-упругая теория Герца [22,23,25,30], в которой принимается следующая связь между ударной силой  $f$  и общей деформацией  $\epsilon$  соударящихся тел:  $f = G\epsilon^{3/2}$ . Коэффициент  $G$  зависит от свойств материалов тел и кривизны их поверхностей в точке контакта. При расчете динамических характеристик удара и возникающего в результате диссипативных процессов импульса температуры  $\Delta T(y,t)$  в окрестности  $y$  ударно-фрикционного контакта частицы воспользуемся рассчитанными в предыдущем Разделе значениями  $w$  и  $u$ . Оценки проведем по формулам в [25,30] для соударения шара (сферическая частица серы радиусом  $R = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ ) и плоскости (плоская поверхность пальца из сплава ВК 8 с податливостью  $\underline{\theta} = 0,85 \cdot 10^{-12} \text{ см}^2/\text{дин}$  [31]).

Время соударения (контакта):	$\tau = 2,92 R \rho^{0.4} (\vartheta + \underline{\vartheta})^{0.4} w^{-0.2}$	(17)
Площадь (радиус $r$ ) контакта:	$s = \pi r^2 = 3,14 R^2 \rho^{0.4} (\vartheta + \underline{\vartheta})^{0.4} w^{0.8}$	(18)
Максимальная контактная сила:	$f = 5,27 R^2 \rho^{0.6} (\vartheta + \underline{\vartheta})^{-0.4} w^{1.2}$	(19)
Напряжение в центре контакта:	$\sigma = 2,54 \rho^{0.2} (\vartheta + \underline{\vartheta})^{-0.8} w^{0.4}$	(20)
Среднее напряжение:	$\langle \sigma \rangle = 2\sigma/3 = 1,69 \rho^{0.2} (\vartheta + \underline{\vartheta})^{-0.8} w^{0.4}$	(20a)
Общая деформация:	$\dot{\epsilon} = \epsilon + \underline{\epsilon} = 1,00 R \rho^{0.4} (\vartheta + \underline{\vartheta})^{0.4} w^{0.8}$	(21)
причем $\epsilon \underline{\theta} = \underline{\epsilon} \theta$ и из (21) следует	$\epsilon = \dot{\epsilon} \theta / (\theta + \underline{\theta})$	(21a)

Выражение для импульса температуры  $\Delta T(y,t)$  в окрестности  $y$  от центра контакта вглубь частицы за время  $\tau'$  действия фрикционного источника тепла с плотностью  $2q$  имеет вид [25,30,32:с.148]:

$$\Delta T(y,t) = 2q (\lambda \rho c)^{-0.5} \{ t^{0.5} \text{iErfc} [y/2(\zeta t)^{0.5}] - (t-\tau')^{0.5} \text{iErfc} [y/2\zeta^{0.5} (t-\tau')^{0.5}] \} \quad (22)$$

Максимальное значение

$$\Delta T_{\max} = \Delta T(0,\tau') = 2q \text{iErfc} [0] (\tau'/\lambda \rho c)^{0.5} \quad (22a)$$

Здесь  $\rho$ ,  $\vartheta = 4(1-\nu^2)/E$ ,  $\nu$ ,  $E$  и  $\zeta = \lambda/\rho c$  - плотность, податливость, коэффициент Пуассона, модуль Юнга и температуропроводность для частицы  $\alpha$ -серы, соответственно. Значения  $\text{iErfc} [z]$  табулированы в [32], в частности,  $\text{iErfc} [0] = 0,5642$ .

Поскольку частица начинает с трением двигаться (скользить) вдоль поверхности пальца со скоростью  $u$ , а заканчивает скольжение со скоростью  $u'$ , то в качестве истинной фрикционной скорости примем их среднеарифметическое  $u(\xi) = (u + u')/2$  и, следовательно [25,30]:

$$2q = \xi \langle \sigma \rangle u(\xi) \quad (23)$$

Для первого ряда пальцев, в связи с выбором  $\xi = \xi_y$  по определению имеем:  $\tau_1 = \tau'_1$ ;  $u_1' = 0$ ;  $u_1(\xi_1) = (u_1 + u_1')/2 = u_1/2$ ;  $2q_1 = \xi_1 \langle \sigma_1 \rangle u_1/2$ . В этом случае из (22a) следует:

$$\Delta T_{m1} = \Delta T(0, \tau_1) = 2q_1 \text{iErfc} [0] (\tau_1/\lambda \rho c)^{0.5} = 0,2821 \cdot \xi_1 \langle \sigma_1 \rangle u_1 \times (\tau_1/\lambda \rho c)^{0.5} \quad (24)$$

Из таблицы 2 видно, что для последующих рядов пальцев  $\xi_i (i=2,3,4) < \xi_1 = \xi$ . Поэтому неравенство (8) нарушается и имеет место случай, когда  $u_i' \equiv 0$ ,  $\tau_i > \tau'_i$ , а  $u_i(\xi) = u/2$ . Определим  $\tau'_i$ .

Пусть среднее значение нормальной составляющей ударной силы  $f(t)$  за время скольжения  $\tau'$  частицы по пальцу равно  $f_{\perp}'$ . Тогда средняя сила трения на контакте за время скольжения  $\tau'$  по определению есть  $f_{\parallel}' = \xi f_{\perp}'$ . За время  $\tau'$  происходит полная потеря касательной составляющей скорости взаимодействия частицы с пальцем:  $u - f_{\parallel}' \tau'/m = \xi f_{\perp}' \tau'/m = u' \equiv 0$ . Отсюда следует:  $\tau' = mu/\xi f_{\perp}'$ .

Таким образом, задача сводится к вычислению  $f_{\perp}'$ . Для этого зададимся пилообразной формой импульса  $f(t)$ :

$$f(t) = 2f t/\tau \quad \text{при } \tau' \leq \tau/2 \quad (25)$$

$$f(t) = 2f(1 - t/\tau) \quad \text{при } \tau/2 < \tau' \leq \tau \quad (25a)$$

где  $f$  - максимальное значение  $f(t)$ , рассчитываемое по формуле (19). Основанием для такого выбора служит следующая оценка. Среднее значение  $f(t)$  за время  $\tau$  равно изменению нормального импульса:  $f_{\perp} = 2m w/\tau$ . Отношение  $= f/f_{\perp} = 1,84$ . Для пилообразного импульса подобное отношение близко к этой цифре и равно 2. Это и подтверждает квазиадекватность модели. Из (25) находим соответствующие средние значения  $f(t)$ :

$$f_{\perp}' = (1/\tau') \cdot \int_0^{\tau'} (2f t/\tau) dt = 2f \tau'/\tau = m u/\xi \tau' \quad (26)$$

$$f_{\perp}' = (1/\tau') \cdot \int_0^{\tau'} (2f t/\tau) dt + \int_{\tau'}^{\tau} 2f(1-t/\tau) dt = f(2-\tau/2\tau'-\tau'/\tau) = m u/\xi \tau' \quad (26a)$$

**Таблица 3** – Динамические характеристики ударной обработки частицы  $\alpha$ -серы в дезинтеграторе при  $\omega = 1047$  рад / с и значения импульсов температуры на контакте

Номер индекса, $i$	$\tau \cdot 10^8$ , с	$\tau' \cdot 10^8$ , с	$f \cdot 10^{-3}$ , дин	$s \cdot 10^8$ , см <sup>2</sup>	$\epsilon \cdot 10^5$ , см	$\sigma \cdot 10^{-10}$ , дин/см <sup>2</sup>	$\langle \sigma \rangle \cdot 10^{-10}$ , дин/см <sup>2</sup>	$\Delta T_m$ , К
1	1,95	1,95	0,857	4,41	2,621	2,94	1,96	770
2	1,51	0,48	3,95	12,2	7,452	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	13,6	27,8	16,98	7,39	4,93	530

Решение этих уравнений относительно  $\tau'$  с учетом  $f = 4m w / \tau$  дает для  $i = 2, 3, 4$ :

$$\tau'_i = (m u \tau_i f)^{0.5} = \tau_i (\xi_i / 2\xi)^{0.5} = 0,707 \tau_i (\xi_i / \xi)^{0.5} \text{ при } \xi \geq 2\xi_i \quad (27)$$

$$\tau'_i = \tau_i - (\tau_i^2 / 2 - m u \tau_i f)^{0.5} = \tau_i [1 - 0,707 (1 - \xi_i / \xi)^{0.5}] \text{ при } \xi_i \leq \xi \leq 2\xi_i \quad (27a)$$

Используя (23) и подставляя из (27) значения  $\tau'_i$  в (24) находим максимумы  $\Delta T_i$ :

$$\Delta T_{mi} = \Delta T(0, \tau'_i) = 0,2821 \cdot \xi_i \langle \sigma_i \rangle u_i (\tau'_i / \rho \lambda c)^{0.5} \quad (28)$$

Сделаем численные оценки (см. таблицу 3) для обработки частиц ромбической серы с учетом, что по значениям  $\xi_i$  выполняются условия (25)-(27) (см. таблицу 2).

Отклонения при расчетах по теории Герца увеличиваются с возрастанием нормальной скорости соударения  $w$  ввиду появления пластических деформаций и потерь на внутреннее трение. Решение же задач динамики неупругого взаимодействия в настоящее время основано на нелинейном упругопластическом законе Герстнера [22,23,33], согласно которому при переходе за предел упругости упругая и пластическая компоненты деформации развиваются независимо друг от друга. Поскольку модель основана на эмпирическом законе, то в основном уравнении модели  $f = b\epsilon^e$ , постоянные  $b$  и  $e$  подлежат экспериментальному определению [33].

Последовательное применение этой модели к вычислению силовых и временных характеристик не приводит к очень значительному отличию оных от вычисленных по теории Герца (см. таблицы 2, 3), но дает возможность определения остаточных деформаций и коэффициента восстановления Ньютона.

С другой стороны, можно оценить нагрев частицы  $\alpha$ -S при ее упругопластическом взаимодействии с пальцем дезинтегратора исходя из энергетических соображений с учетом данных таблиц 2, 3. Допустим, что при наличии остаточных деформаций частица достаточно малого радиуса (в нашем случае  $R = 5 \cdot 10^{-4}$  см) будет нагреваться однородно и повышение ее температуры  $\Delta T^*$  определится из простого соотношения:

$$m c \Delta T^* = m V^2 / 2 \quad \text{или} \quad \Delta T^* = V^2 / 2c \quad (29)$$

Поскольку время между соударениями не превышает  $10^{-3}$  с, то перед следующим столкновением частица, скорее всего, не успевает остыть и, следовательно:

$$\Delta T_{i+1}^* = \Delta T_i^* + V_{i+1}^2 / 2c \quad (29a)$$

Расчеты по (29), в дополнение к таблице 3, дают:  $\Delta T_1^* = 1,6$ 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 пластических деформаций. С другой стороны трудно отрицать и возможность остывания частицы в промежутке между соударениями. Поэтому приведенные значения  $\Delta T^*$  можно рассматривать только в качестве первого приближения.

### 3. Обсуждение результатов и практические рекомендации

Рассмотрим соответствие полученных результатов упругой модели Герца для соударения частицы  $\alpha$ -S (радиус  $R = 5 \cdot 10^{-4}$  см) с пальцами дезинтегратора (таблица 3). Во-первых, времена ударного ( $\tau_i$ ) и фрикционного ( $\tau'_i$ ) взаимодействия имеют порядок величины  $10^{-8}$ с:  $\tau_i$  уменьшаются не более чем 1,6 раза согласно (17) с увеличением  $w$  (таблица 2);  $\tau'_i$  определяются исходными положениями. Все остальные характеристики соударений существенно растут. В частности, отношение деформации к диаметру частицы  $\epsilon_i / 2R$  находится в интервале  $0,026 \div 0,17$  или  $2,6 \div 17\%$ , что на порядки величин превышает допустимые упругие деформации для кристаллов, которые составляют десятые доли процента [34:с.68]. Поэтому при соударениях частицы ромбической серы с пальцами для высоких оборотов роторов имеют место значительные остаточные деформации. Определим интервал для скоростей  $\Delta w^*$ , при которых отношение  $\Delta(\epsilon^* / 2R)$  будет находиться в пределах, скажем,  $0,1 \div 0,9\%$ . Для максимальных выходных значений  $w_4^*$  из формул (21) получаем:  $\Delta(\epsilon_4^* / 2R) = 0,5 \rho^{0.4} \theta (\theta + \theta)^{-0.6} (\Delta w_4^*)^{0.8} = k \cdot (\Delta w_4^*)^{0.8}$ ;  $(\Delta w_4^*)^{0.8} = \Delta(\epsilon_4^* / 2Rk)$  или  $\Delta w_4^* = [\Delta(\epsilon_4^* / 2Rk)]^{1.25}$ , где  $k = 3,4 \cdot 10^{-5} [\text{с/см}]^{0.8}$ . Находим:  $\Delta w_4^* (0,1 \div 0,9 \%) = 70 \div 1100 \text{см/с}$  или, согласно (6), интервалу  $\Delta \omega^* = 20 \div 300 \text{об/мин}$ . Полу-

ченный результат по  $\Delta\omega^*$  находится в полном соответствии с экспериментом [22,33], а по  $\Delta\omega^*$  - технически нереализуем (рабочие частоты оборотов ротора дезинтегратора  $\omega > 500$  об/мин).

Поэтому можно констатировать, что упругая модель соударений частиц серы по теории Герца в дезинтеграторе принципиально невозможна, а имеет место кинематика и динамика абсолютно неупругих соударений, описываемых формулами (9)-(16) и (29).

Моделирование соударения частицы  $\alpha$ -S с пальцами дезинтегратора было проведено при исключении возможности ее разрушения (на входе и выходе мы имели частицу серы с массой  $m$ ). Однако известно [34:с.131], что разрушение кристаллов происходит тогда, когда внешние напряжения  $\sigma$  окажутся достаточными для разрыва связей между атомами ( $\sim 0.1E$ ). Напряжение  $\sigma$  порядка одной десятой модуля Юнга называется теоретической прочностью твердого тела. В нашем случае при  $\omega = 1047$  рад/с мы имеем:  $E(\alpha-S) = 1,8 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>;  $\Delta[\sigma_{\alpha-S}/E(\alpha-S)] = 0,16 \div 0,41$  (см. таблицу 3). Реально же в большинстве случаев механическое разрушение происходит при напряжении много меньшем теоретической прочности. Например, применительно к галиту (NaCl) разрушение кристалла имеет место при  $\sigma/E = 0,026$  [35]. Следовательно, если применить это значение и к частицам  $\alpha$ -S, то должно происходить их интенсивное разрушение уже при  $\sigma_4^* = 0,026E = 4,7 \times 10^9$  дин/см<sup>2</sup>, что по формуле (20) соответствует следующим величинам:  $w_4^* = w_4 [4,7 / 74]^{2,5} = 43$  см/с;  $\omega^* = 1$  рад/с = 10 об/мин. Как и выше, приходим к выводу, что в любом рабочем режиме оборотов дезинтегратора будет происходить высокоскоростное измельчение частиц серы.

Более того при разрушении в носке магистральных трещин реализуются также и фрактоэмиссионные явления [19]. Поэтому процесс разрушения в дезинтеграторе, также как явления трения, упругопластической деформации и дефектообразования, играют доминирующую роль в процессе МА серы.

Из таблицы 3 также видно, что расчетные величины локальных температур  $\Delta T$  по нелинейно-упругой модели соударений составляют сотни градусов, что значительно превышает температуру плавления  $\alpha$ -S, равной 112,8°C. Как было показано в [18,25], в таких случаях температура на ударно-фрикционном контакте  $\Delta T$  ограничивается контактной температурой плавления, которая в нашем случае не превысит 112,8°C. Поскольку мы уже показали, что справедливы подходы упругопластической динамики, которые по формуле (16) исключают возможность контактного плавления частиц  $\alpha$ -S и только по (29) допускают ее, так как  $\Delta T_4^* = 200$  К. Рассчитаем такую скорость частиц серы  $V_4^*$ , когда  $\Delta T_4^*$  будет меньше 112,8°C, скажем по (29а) будет

равна 100 К, что из-за линейной зависимости  $V(\omega)$  заведомо исключит возможность плавления серы. Тогда, согласно таблице 2,  $\Delta T_4^* = [(V_4^*/8,3)^2 + (V_4^*/2,8)^2 + (V_4^*/1,5)^2 + (V_4^*)^2]/2c = 1,6(V_4^*)^2/2c = 100$  К или  $V_4^* = 9400$  см/с, что соответствует  $\omega^* = 230$  рад/с = 2200 об/мин.

Таким образом, наиболее оптимальными условиями для МА частиц серы можно считать «мягкие» частоты  $\omega \sim 2000$  об/мин, которые полностью исключают возможность контактного плавления и явления комкования серы, как это имеет место в высокоэнергетических шаровых мельницах, при сохранении остальных преимуществ. Поэтому это делает дезинтегратор наиболее перспективным устройством для предварительной МА частиц серы для последующих технологических операций по получению полисульфидов и, как следствие, целевого продукта - наносеры.

Теоретический расчет фазового угла  $\phi(l)$  позволяет сделать ряд практических рекомендаций относительно конструкции дезинтегратора. Например, из формул (1) и (5) следует, что максимальное значение  $\phi(l_i) = \phi_m = \phi(l_{ii})$  (см. таблицу 1). Как видно, для соударения частицы с первым рядом пальцев  $\phi(l_{11}) = 16^\circ$ . Угол же между пальцами первого ряда равен  $2\pi/n_1 = 60^\circ$ . Это означает, что  $(60-16)/60 = 73\%$  поступающего вещества минуют первый ряд пальцев без соударения, второй ряд без соударения минуют 25% частиц, а 4% вообще не подвергаются ударной обработке. Если бы в конструкции рассматриваемого дезинтегратора было бы рассчитанное и указанное в таблице 1 звездочками число пальцев в соответствующих рядах, то каждая частица подверглась бы максимально возможной 4-х кратной обработке.

#### 4. Заключение

Проведено численное моделирование механической обработки части серы в дезинтеграторе с целью определения оптимальных параметров их активации для последующих технологических операций по получению полисульфидов аммония, щелочных и щелочноземельных металлов, которые имеют широкий спектр применений при обогащении минерального сырья и синтезе наносеры.

#### Благодарности

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 15-05-03980А и целевой научно-технической программы Республики Казахстан «0130/ПЦФ-14 «Разработка новых методов получения наночастиц серы для создания технологий производства препаратов различного функционального назначения».*

#### Список литературы

- 1 Юсупов Т.С. Совершенствование процессов раскрытия минеральных сростков как путь к освоению труднообогатимых рудных объектов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016. – №3. – С. 143-150.

- 2 Юсупов Т.С., Бакшеева И.И., Ростовцев В.И. Исследование влияния различных видов механических воздействий на селективность разрушения минеральных ассоциаций // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 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 // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 5. – С. 161-168.
- 4 Правдина М.Х. Вихревая мельница для измельчения хрупких и пластичных материалов // Процессы переноса в зернистом слое / под ред. Гольдштик М.А. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2005, 358 с. – Приложение 2: С. 315-358.
- 5 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.
- 6 Laptev Yu.V., Shevchenko V.S., Urakaev F.Kh. Sulphidation of valleriite in  $\text{SO}_2$  solutions // Hydrometallurgy. – 2009. – Vol. 98. – P. 201-205.
- 7 Уракаев Ф.Х., Кетеменов Т.А., Уралбеков Б.М., Буркитбаев М.М. Кинетика абразивно-реакционного синтеза наноконпозигов в системе  $\text{SiO}_2\text{-C/S}$  // Вестник КазНУ. Серия химическая. – 2015. – № 1. – С. 52-62.
- 8 Уракаев Ф.Х., Татыкаев Б.Б., Буркитбаев М.М., Бахадур А.М., Уралбеков Б.М. Механохимический синтез коллоидных частиц бромида серебра в системе  $\text{NaBr-AgNO}_3\text{-NaNO}_3$  // Коллоидный журнал. – 2016. – Т. 78, № 4. – С. 525-532.
- 9 Уракаев Ф.Х., Буркитбаев М.М., Татыкаев Б.Б., Уралбеков Б.М. Получение наночастиц хлорида серебра механической обработкой системы  $\text{NH}_4\text{Cl-AgNO}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3$  // Вестник КазНУ. Серия химическая. – 2014. – № 2 (74). – С. 53-59.
- 10 Уракаев Ф.Х., Булавченко А.И., Уралбеков Б.М., Массалимов И.А., Татыкаев Б.Б., Болатов А.К., Джарлыкасымова Д.Н., Буркитбаев М.М. Механохимический синтез коллоидных частиц серы в системе  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3\text{-H}_2(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4)\text{-Na}_2\text{SO}_3$  // Коллоидный журнал. – 2016. – Т. 78, № 2. – С. 193-202.
- 11 Массалимов И.А., Хусаинов А.Н., Зайнитдинова Р.М., Мусавирова Л.Р., Зарипова Л.Р., Мустафин А.Г. Химическое осаждение наночастиц серы из водных растворов // Журнал прикладной химии. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 705-710.
- 12 Массалимов И.А., Шайнурова А.Р., Хусаинов А.Н., Мустафин А.Г. Получение наночастиц серы из водного раствора полисульфида калия // Журнал прикладной химии. – 2012. – Т. 85, № 12. – С. 1944-1949.
- 13 Массалимов И.А., Абдракипова Л.Ф., Хусаинов А.Н., Мустафин А.Г. Выделение наночастиц серы из растворов полисульфидов кальция и натрия // Журнал прикладной химии. – 2009. – Т. 82, № 12. – С. 1946-1951.
- 14 Massalimov I., Medvedev Yu., Urakaev F., Ahmed I.S.A., Burkitbayev M., Uralbekov B.. Antifungal activity of inorganic micro- and nanoparticles against pathogenic Fungi compared with some traditional organic drugs // American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences. – 2016. – Vol. 16. – P. 652-662.
- 15 Massalimov I.A., Yanakhmetov M.R., Chuykin A.E., Mustafin A.G. Protection of building constructions with sulfur impregnating solution // Study of Civil Engineering and Architecture. – 2013. – Vol. 2. – P. 19-24.
- 16 Bowden F.P., Persson P.A. Deformation, heating and melting of solids in high-speed friction // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. – 1961. – Vol. 260. – P. 433-458.
- 17 Клейс И.Р., Уээмыйс Х.Х. Износостойкость элементов измельчителей ударного действия. – М.: Машиностроение, 1986 – 160 с.
- 18 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. – P. 197-206.
- 19 Urakaev F.Kh. Mechanochemical destruction of minerals at the crack tip (Overview): 1. Experiment // Physics and Chemistry of Minerals. – 2007. – Vol. 34. – P. 351-361.
- 20 Планиоль Р. Центробежная мельница, работающая под вакуумом // Труды европейского совещания по измельчению. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 473-483.
- 21 Уракаев Ф.Х., Чумаченко Ю.В., Шевченко В.С., Таранова И.В. Новые данные об ускорении химических реакций методом механической активации // Дезинтеграторная технология. – Таллин: АН СССР, 1987. – С. 34-35.
- 22 Гольдсмит В. Удар. – М.: Госстройиздат, 1965. – 447 с.
- 23 Пановко Я.Г. Введение в теорию механического удара. – М.: Наука, 1977 – 244 с.
- 24 Раус Э.Дж. Динамика системы твердых тел. В 2-х томах. – М.: Наука, 1983. – Т. I. – 464 с.
- 25 Urakaev F.Kh. Mechanism and kinetics of mechanochemical processes // High-Energy Ball Milling: Mechanochemical Processing of Nanopowders / ed. by Sopicka-Lizer M. – Oxford: Woodhead Publishing Limited, 2010. – Ch. 2. – P. 9-44.
- 26 Андерсон О. Определение и некоторые применения изотропных упругих постоянных поликристаллических систем, полученных из данных для монокристаллов Физическая Акустика / под. ред. Мэзона У. – М.: Мир, 1968. – Т. III, Ч. Б. – С. 62-121.
- 27 Urakaev F.Kh. Simulation of the mechanically induced self-propagating reactions: heat source of “viscous flow” and mechanism of MSR in Zn-S system // Combustion Science and Technology. – 2013. – Vol. 185, Is. 9. – P. 1281-1294.
- 28 Urakaev F.Kh. Numerical simulation of a new mechanochemical method for the formation of amorphous solids and nanocomposites // Mendeleev Communications. – 2005. – Vol. 15, Is. 3. – P. 106-111.

- 29 Шелудяк Ю.Е., Кашпоров Л.Я., Л.А. Малинин, В.Н. Цалков. Теплофизические свойства компонентов горючих систем. Справочник / ред. Силин Н.А. – М.: НПО «ИТЭИ», 1992. – 184 с.
- 30 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.
- 31 Капитонов А.М., Редькин В.Е. Физико-механические свойства композиционных материалов. Упругие свойства. – Красноярск: СФУ, 2013. – 531 с.
- 32 Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
- 33 Батуев Г.С., Голубков Ю.В., Ефремов А.К., Федосов А.А. Инженерные методы исследования ударных процессов. – М.: Машиностроение, 1969. – 248 с.
- 34 Урусовская А.А. Механические свойства кристаллов // Современная кристаллография. Том 4: Физические свойства кристаллов / ред. колл.: Вайнштейн Б.К., Чернов А.А., Шувалов Л.А. – М.: Наука, 1981. – Гл. 2. – С. 47-152.
- 35 Gyulai Z. Festigkeits- und Plastizitätseigenschaften von NaCl-Nadelkristallen // Zeitschrift für Physik. – 1954. – Vol. 138. – Is. 3-4. – P. 317-321.

### References

- 1 Yusupov TS (2016) J Min Sci+ 52:143-150. (In Russian)
- 2 Yusupov TS, Baksheeva II, Rostovtsev VI (2015) J Min Sci+ 51:182-188. (In Russian)
- 3 Yusupov TS, Urakaev FKh, Isupov VP (2015) J Min Sci+ 51:161-168. (In Russian)
- 4 Pravdina MKh (2005) Transfer processes in the granular layer [Protsesty y perenosa v zernistom sloe]. IT SO RAN, Novosibirsk, Russia. (In Russian). ISBN 5-89017-028-7
- 5 Shevchenko VS, Laptev YuV, Kolonin GR, Shestakova RD, Petrushin EI, Savintsev YuP, Yusupov TS, Urakaev FKh (2007) Chemistry for Sustainable Development 15:215-223. (In Russian). [http://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=119864&ARTICLE\\_ID=127294](http://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=119864&ARTICLE_ID=127294)
- 6 Laptev YuV, Shevchenko VS, Urakaev FKh (2009) Hydrometallurgy 98:201-205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.06.002>
- 7 Urakaev FKh, Ketegenov TA, Uralbekov BM, Burkitbayev MM (2015) Chemical Bulletin of Kazakh National University 1:52-62. (In Russian). <http://dx.doi.org/10.15328/cb577>
- 8 Urakaev FKh, Tatykaev BB, Burkitbayev MM, Bakhadur AM, Uralbekov BM (2016) Colloid J+ 78:525-532. (In Russian). <http://dx.doi.org/10.7868/S0023291216040194>
- 9 Urakaev FKh, Burkitbayev MM, Tatykaev BB, Uralbekov BM (2014) Chemical Bulletin of Kazakh National University 2:53-59. (In Russian). [http://dx.doi.org/10.15328/chemb\\_2014\\_253-59](http://dx.doi.org/10.15328/chemb_2014_253-59)
- 10 Urakaev FKh, Bulavchenko AI, Uralbekov BM, Massalimov IA, Tatykaev BB, Bolatov AK, Zharlykasimova DN, Burkitbayev MM (2016) Colloid J+ 78:210-219. <http://dx.doi.org/10.1134/S1061933X16020150>
- 11 Massalimov IA, Khusainov AN, Zainitdinova RM, Musavirova LR, Zaripova LR, Mustafin AG (2014) Russ J Appl Chem+ 87:700-708. <http://dx.doi.org/10.1134/S1070427214060068>
- 12 Massalimov IA, Shainurova AR, Khusainov AN, Mustafin AG (2012) Russ J Appl Chem+ 85:1832-1837. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.1134/S1070427212120075>
- 13 Massalimov IA, Abdrakipova LF, Khusainov AN, Mustafin AG (2009) Russ J Appl Chem+ 82:2087-2092. (In Russian) <http://dx.doi.org/10.1134/S1070427209120027>
- 14 Massalimov I, Medvedev Yu, Urakaev F, Ahmed ISA, Burkitbayev M, Uralbekov B (2016) American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences 16:652-662. <http://dx.doi.org/10.5829/idosi.ajeaes.2016.16.4.12902>
- 15 Massalimov IA, Yanakhmetov MR, Chuykin AE, Mustafin AG (2013) Study of Civil Engineering and Architecture 2:19-24.
- 16 Bowden FP, Persson PA (1961) P Roy Soc Lond A Mat 260:433-458. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1961.0044>
- 17 Kleis IR, Uuémýis KhKh (1986) The Wear Resistance of Elements of Impact Action Grinders [Iznosostoykost' elementov izmel'chiteley udarnogo deystviya]. Mashinostroenie, Moscow, Russia. (In Russian)
- 18 Urakaev FKh, Boldyrev VV (2000) Powder Technol 107:197-206. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00200-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00200-4)
- 19 Urakaev FKh (2007) Phys Chem Miner 34:351-361. <http://dx.doi.org/10.1007/s00269-007-0153-y>
- 20 Planiol R (1962) European Symposium on Size Reduction [Trudy evropeyskogo soveshaniya po izmelcheniyu]. Stroyizdat, Moscow, Russia. (In Russian)
- 21 Urakaev FKh, Chumachenko YuV, Shevchenko VS, Taranova IV (1987) Disintegrator Technology [Dezintegratornaya tehnologiya]. Nauchno-proizvodstvennoe ob'edinenie "Dezintegrator", Tallinn, USSR. (In Russian)
- 22 Goldsmith W (1965) Impact [Udar]. Gosstroyizdat, Moscow, Russia. (In Russian)
- 23 Panovko YG (1977) Introduction to Mechanical Shock [Vvedenie v teoriyu mehanicheskogo udara]. Nauka, Moscow, USSR. (In Russian) <http://www.twirpx.com/file/484011/>
- 24 Routh EJ (1983) Dynamics of a System of Rigid Bodies. In 2 Volumes [Dinamika sistemyi tverdykh tel. V 2 tomah]. Nauka, Moscow, USSR. (In Russian)

- 25 Urakaev FKh (2010) High-Energy Ball Milling: Mechanochemical Processing of Nanopowders. Woodhead Publishing Limited, Oxford, UK. ISBN: 978-1-84569-531-6
- 26 Anderson OL (1965) Physical Acoustics [Fizicheskaya akustika]. Mir, Moscow, USSR. (In Russian) ISBN: 978-0-12-395669-9
- 27 Urakaev FKh (2013) Combust Sci Technol 185:1281-1294. <http://dx.doi.org/10.1080/00102202.2013.783028>
- 28 Urakaev FKh (2005) Mendeleev Commun 15:106-111. <http://dx.doi.org/10.1070/MC2005v015n03ABEH001956>
- 29 Sheludyak YE, Kashporov LY, Malinin LA, Tsalka VN (1992) Thermal Properties for Combustible Systems Components [Teplofizicheskie svoystva komponentov goryuchih sistem. Spravochnik]. NPO "ITEI", Moscow, Russia. (In Russian)
- 30 Urakaev FKh, Boldyrev VV (2000) Powder Technol 107:93-107. [http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00175-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00175-8)
- 31 Kapitonov AM, Red'kin VE (2013) Physical and Mechanical Properties of Composite Materials. Elastic Properties [Fiziko-mehanicheskie svoystva kompozitsionnyih materialov. Uprugie svoystva]. SFU, Krasnoyarsk, Russia. (In Russian) ISBN: 978-5-7638-2750-7
- 32 Lykov AV (1967) Theory of Heat Conduction [Teoriya teploprovodnosti]. Vysshaya Shkola, Moscow, USSR. (In Russian)
- 33 Batuev GS, Golubkov YuV, Efremov AK, Fedosov AA (1969) Engineering Research Methods of Impact Processes [Inzhenernyie metody issledovaniya udarnyih protsessov]. Mashinostroenie, Moscow, USSR. (In Russian)
- 34 Urusovskaya AA (1988) Modern Crystallography IV: Physical Properties of Crystals [Sovremennaya kristallografiya. Tom 4: Fizicheskie svoystva kristallov]. Nauka, Moscow, USSR. (In Russian)
- 35 Gyulai Z (1954) Z Phys 138:317-321.