

П. И. Пилов /д. т. н./, Л. Ж. Горобец /д. т. н./

НТУ «Днепровская Политехника», г. Днепро, Украина

И. В. Верхоробина

Институт геотехнической механики НАН Украины, г. Днепро, Украина

Расширение области использования диспергированных продуктов обогатительных и металлургических предприятий. Сообщение 1

P. I. Pilov /Dr. Sci. (Tech.)/,
L. J. Gorobets /Dr. Sci. (Tech.)/National Technical University
“Dnipro polytechnic”, Dnipro, Ukraine

I. V. Verhorobina

Institute of Geotechnical Mechanics named after
M. S. Polyakov of the NAS of Ukraine, Dnipro,
Ukraine

Expansion of the use of dispersed products of concentrating and metallurgical enterprises. Message 1

Цель. Обоснование направлений эффективной переработки путем диспергирования продуктов и отходов обогатительной и металлургической промышленности.

Методика. Исследование материалов методом струйного диспергирования, оценка показателей дисперсности и поверхностной активности порошков потенциометрическим методом и на приборе фирмы «MALVERN» (Великобритания).

Результаты. Теоретически обоснованы и подтверждены промышленными экспериментами способы и режимы диспергирования в струях, диапазоны рациональной дисперсности продуктов, установлены показатели и направления использования газоструйной технологии. Получены технико-экономические данные о работе газоструйных установок промышленного типоразмера при диспергировании цирконового концентрата, металлургического и фосфорного шлака, талько-магнезитов, стекольного песка.

Научная новизна. С позиции физики разрушения установлены ведущие факторы повышения эффективности диспергирования и степени механоактивации продуктов газоструйным методом. Произведен обоснованный выбор технологических вариантов использования газоструйных установок для эффективной переработки сырья и отходов обогатительной и металлургической промышленности Украины.

Практическая значимость. Согласно теоретическим разработкам, экспериментальной проверке и накопленному производственному опыту рекомендуется ряд направлений технологического применения активированных высокодисперсных материалов. Переработка диспергированных продуктов талько-магнезитов Правдинского месторождения позволит реализовать замену привозного огнеупорного сырья на отечественное по практически безотходной технологии. (Ил. 5. Табл. 2. Библиогр.: 14 назв.)

Ключевые слова: диспергирование в струях, концентраты, отходы, удельная поверхность, механоактивация, микропорошки, технологии переработки.

DOI: 10.33101/S005-489604

Постановка проблемы. Для успешного обогащения многих видов ценного минерального сырья, содержащего металлы (цирконий, титан, вольфрам, молибден, кобальт, алюминий, марганец) необходима высокая дисперсность – менее 0,07 (0,04) мм. Однако при измельчении в барабанных мельницах степень раскрытия ценных минералов недостаточна, а реакционная способность тонких фракций невысока, что исключает эффективную рудоподготовку в обогащении, химической и гидрометаллургической переработке.

Разработка принципиально новых технических решений по тонкому измельчению технологически упорных руд, промпродуктов и отходов актуальна и важна для решения проблемы вовлечения в переработку руд с тонкодисперсными включениями ценных минералов и низким содержанием металлов. Из-за высокой энергоемкости получения тонкодисперсных порошков актуален поиск рационального способа и режима измельчения для различных технологических задач.

В настоящее время накоплен опыт исследований, апробации и промышленного освоения технологий рудоподготовки и переработки диспергированных продуктов на базе использования принципа *газоструйного измельчения*. Это направление тонкого измельчения изучается и развивается с использованием в качестве энергоносителя холодного воздуха, продуктов сгорания природного газа или перегретого пара [1–3].

Технология измельчения с использованием продуктов сгорания природного газа (температурой 500–600 °С, давлением в камере сгорания 0,2–0,38 МПа) разработана сотрудниками Национального горного университета и впервые в отечественной практике освоена на Верхнеднепровском ГМК (ныне Вольногорском горно-металлургическом комбинате) для получения диспергированного цирконового концентрата (60–40 мкм) [4]. Цирконовый концентрат применяется в производстве эмалей, глазурей, стекла, огнеупорных материалов и изделий, металлического циркония и его соединений, ферросплавов, в литейном производстве.

В дальнейшем на стендах КБ «Южное» и Института технической механики НАН Украины была подтверждена определяющая роль нагретых струй в диспергировании и механоактивации материалов, апробированы новые способы и устройства для получения высокотемпературного энергоносителя, обоснованы рекомендации по их применению в установках промышленных типоразмеров.

Приобретен опыт измельчения до высокой дисперсности в струях многих видов гетерогенных материалов при большом разнообразии их свойств: плотность – $(1,5–6) \cdot 10^3$ кг/м³, твердость по десятибалльной шкале – 1–9. Получены продукты и микропорошки, отвечающие требованиям высоких технологий на предприятиях Украины и в странах СНГ. Размеры основных фракций продуктов составляют диапазон единиц и десятка микрометра, удельная поверхность – до 2 м²/г [2–5].

К настоящему времени разработаны технологии струйного измельчения и дальнейшего технологического использования диспергированных продуктов из концентратов (марганцевый, магнетитовый, дистеновый, сурьмяный, вольфрам- и молибденсодержащий, пирротинный, золотосодержащий) ОФ и ГОКов, промпродуктов и отходов сырья огнеупорных и абразивных комбинатов, алмазных и керамических заводов, кварцевых песков заводов стекловолокна, шлаков химических и металлургических предприятий.

Практика многочисленных исследований показала заметные эффекты изменения технологических свойств высокодисперсных (начиная с

области менее 100 мкм) материалов. Эти эффекты объясняют уровнем *механоактивации* – количества свободной энергии, запасенной твердым телом при его обработке и разрушении (сжатием, ударом, трением, взрывом).

Степень механоактивации принято оценивать различными технологическими параметрами в зависимости от вида переработки: например, вязкими свойствами, прочностью изделий, скоростью растворения, температурой реакции, расходом реагентов, степенью раскрытия ценных минералов, эффективностью обогащения или гидрометаллургического процесса. Согласно исследованиям многих диспергированных порошков ценную информацию об энергетическом состоянии поверхности частиц можно получить потенциометрическим методом на основе определения характеристик адсорбционной активности частиц (менее 100 мкм) [2; 6].

Цель работы – на базе анализа теоретических положений и практики диспергирования в струях обосновать направления использования газоструйной технологии в Украине для эффективной переработки продуктов и отходов обогащательных и металлургических предприятий.

Анализ публикаций. Ключевую роль в развитии теории диспергирования [2] сыграли достижения науки о разрушении [7–10] (концепции, методологии, принципы, критерии, способы нагружения), включающие кинетическую концепцию С. Н. Журкова, концентрационный критерий В. С. Куксенко, автоколебательную теорию предразрушения по В. Н. Бовенко, авторскую установку (УНТС) А. Д. Алексеева и методику С. Б. Дубровой для исследования запредельного деформирования геосред, потенциометрический метод И. М. Юрьевской для оценки поверхностной активности тонких фракций.

Для решения поставленной задачи рассмотрим с позиции физики разрушения некоторые теоретические положения основ диспергирования. Диспергирование – это заключительная стадия разрушения нагружаемой среды с раскрытием тонкодисперсных *активированных* фрагментов и отдельностей, которая развивается в активных локальных зонах в критическом состоянии вещества на стадии *авторезонанса*. Длительность авторезонанса определяет относительный объем образующихся тонких фракций и величину $\Delta S/V$ удельной поверхности измельченного продукта (ΔS – прирост новой поверхности при измельчении исходного продукта объемом V).

Явление механоактивации представляется одной из форм автовозбуждения активности вещества нагруженного твердого тела. Эффекты механоактивации связаны с величиной *средней* W_V (в объеме образца) и *локальной* $W_{\Delta V}$ (в очагах

разрушения) плотности энергии при разрушении [2; 9].

Параметр $W_V = \sigma_o \varepsilon_o / 2$ – это оценка энергии, приданной телу в процессе нагружения, отнесенной к единице его объема. W_V характеризует удельные энергозатраты на *дробление* (развал сплошности нагружаемого тела с образованием крупных фрагментов и мелких частиц).

Параметр $W_{\Delta V} = W_V / \varepsilon_d$ – это локальная плотность энергии на единицу объема очага разрушения (σ_o, ε_o – предел прочности и деформация ε_o на пределе прочности, ε_d – относительная деформация на стадии диспергирования). Величина $W_{\Delta V}$ служит прогнозной оценкой удельного расхода энергии на *диспергирование*, поскольку по физической сути характеризует «энергетический порог» акта диспергирования, при переходе через который происходит высвобождение накопленной энергии с раскрытием очагов разрушения (зон образования тонкодисперсных фракций).

Согласно исследованиям, высокий уровень W_V и $W_{\Delta V}$ достижим при высоких давлениях или высокочастотном импульсном нагружении, когда скорость нагружения частиц приближается к критической скорости *автоколебательного резонанса*. Это означает, что ведущим фактором повышения эффективности диспергирования и уровня механоактивации является скорость динамической деформации ($\dot{\varepsilon} = V/d \cong 10^5 - 10^6 \text{ с}^{-1}$; V, d – соответственно скорость удара и размер частиц). С ростом $\dot{\varepsilon}$ ускоряется (на микро- и нано-уровнях) накопление энергии в активированных структурных дефектах, что способствует разрыхлению структуры, развитию микроструктурных превращений и механоактивации вещества.

Диспергирование материалов в струях осуществляется путем превращения потенциальной энергии рабочего газа в кинетическую энергию частиц. Для создания режимов высоких давлений используется энергия рабочего газа, сжатого до давлений в диапазоне 0,3–2,0 МПа, холодного или нагретого до температуры $T \cong 200 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$. Диспергирование происходит без мелющих тел, т.е. без добавки в продукт примесей от износа мелющих тел. Частицы измельчаются нагружением высокоскоростными ударами, динамическим трением или в комбинированном режиме – сочетанием этих двух механизмов разрушения.

В газоструйных установках противоточного типа относительная скорость соударения частиц достигает удвоенной скорости звука в воздухе. Разрушение гетерогенных материалов в газоструйной мельнице происходит практически хрупким образом, так как времена взаимодействия частиц при их соударении друг с другом составляют $10^{-10} - 10^{-9}$ с в микронной области размеров частиц и уменьшаются до $10^{-12} - 10^{-13}$ с в области

наноразмеров. Таким образом, газоструйная мельница, по заключению В. Н. Бовенко, представляет собой «*необратимую термодинамическую машину квазихрупкого разрушения*, которая трансформирует энергию налетающих частиц в энергию акустического излучения, в кинетическую и поверхностную энергию разлетающихся осколков, причем коэффициент полезного действия такой машины равен квантовому КПД АЭ» [10]:

$$\eta_{кв} = (P_{\text{макс}} c) / U = (hc / a) / U = hv_m / U = 10^{-2} - 10^{-3}, \quad (1)$$

где $P_{\text{макс}}$ – максимальная энергия фонона, c – скорость звука в твердом теле, U – энергия межатомной связи, v_m – максимальная частота колебаний атомов в акустической волне, h – постоянная Планка.

С учетом новых представлений о КПД диспергирования определенная часть энергии, приобретаемой частицами при соударениях, превращается в акустическую энергию. На этой физической основе реализуется акустический мониторинг зоны помола струйной мельницы [2; 11].

Варьирование параметров энергоносителя позволяет изменять кинетическую энергию частиц и в результате – режим диспергирования, в частности скорость и частоту соударений частиц в зоне помола. При скорости соударений частиц 0,3–0,5 км/с в веществе действуют напряжения порядка сотен МПа и деформации на уровне единиц и десятков процентов. Период взаимных соударений частиц (время накачки энергией) в рабочей зоне соизмерим со временем их разрушения, что приводит к интенсификации диспергирования. В результате структура трудноскрываемых упорных и тонкозернистых руд разуплотняется по межзеренным границам минералов с преимущественным сохранением целостности полезных минералов. При этом достигается раскрытие минералов без избыточного измельчения с повышением качества обогащенного концентрата.

Газоструйный способ измельчения обеспечивает в наибольшей мере термодинамическую обработку частиц по сравнению с другими способами, поскольку по тракту установки дополнительно используется тепловая энергия рабочего газа с температурой до $600 \text{ }^\circ\text{C}$, передаваемая частицам в процессе их разгона и пневмотранспортирования.

Скорость разгоняемых частиц возрастает с увеличением скорости W истечения энергоносителя, связанной с температурой T_k и давлением P_k перед истечением из сопла согласно формуле (2) (где P_a – давление в разгонной трубке; κ – показатель адиабаты, φ – коэффициент потерь скорости; для воздуха $\kappa = 1,4$; $\varphi = 0,8 - 0,9$):

$$W = \varphi \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_k \left[1 - \left(\frac{P_a}{P_k} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]}. \quad (2)$$

ГОРНОРУДНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Расчетами установлено, что подогрев воздуха на 200 °С обеспечивает прирост скорости истечения примерно на 30 %. В практике соблюдается соотношение, связывающее величину производительности G мельницы со скоростью W и температурой T нагретого и холодного (W_0, T_0) энергоносителя:

$$\frac{W}{W_0} \cong \sqrt{\frac{T}{T_0}} \cong \sqrt{\frac{G}{G_0}}. \quad (3)$$

Измельчаемые частицы в потоке газозвеси температурой порядка 400 °С испытывают влияние термодинамического воздействия (термодара), что может повышать интенсивность необратимого разупрочнения геоматериалов при разрушении (за счет смены деформаций сжатия и растяжения). Исследования [2] подтвердили положительное влияние температуры энергоносителя при газоструйном измельчении труднообогатимых железорудных продуктов, талько-магнезитов, концентратов (цирконовый, марганцевый, шепелитовый).

Изложение основного материала и результаты исследования. В табл. 1 приведены сравнительные показатели работы на холодном и нагретом энергоносителе промышленных струйных установок производительностью 1,2–4 т/ч на различном сырье. Измельчались: цирконо-

концентрат, талько-магнезиты, стекольный песок, шлак и песок для керамического производства.

На рис. 1а показана принципиальная схема промышленной газоструйной установки, включающей комплекс агрегатов и узлов системы преобразования энергии рабочего газа в работу по разрушению, классификации, транспортированию газозвеси, разделению твердой и газовой фаз, очистки отработавшего газа. Основными узлами установки являются источники газового энергоносителя, измельчитель, классификатор, система пылеулавливания.

На рис. 1б показан общий вид газоструйной установки промышленного масштаба (производительность до 2,2 т/ч) с применением камер сгорания турбореактивного двигателя ВК-1А. Камеры отработавшего гарантийный срок двигателя были усовершенствованы для надежного и устойчивого сжигания в них природного газа. Опыт использования камер сгорания ТРД в газоструйных установках в условиях Вольногорского ГМК и Волгоградского керамического завода показал их надежность и высокие эксплуатационные качества. При дальнейшем освоении газоструйных мельниц нашли применение реконструированные камеры сгорания турбореактивных двигателей ВРД (типа М 701).

Струйная технология измельчения цирконо-

Таблица 1

Показатели работы газоструйных установок промышленного типоразмера

№ п/п	Показатель	Размерность	Талько-магнезит	Циркон	Циркон	Шлак*	Песок*	Песок стекольный**	Песок стекольный**
1	Вид энергоносителя	-	ПС	ПС	ХВ	ПС	ПС	ПС	ХВ
2	Давление воздуха	МПа	-	-	0,5	-	-	-	0,39
	Давление продуктов сгорания	МПа	0,2–0,28	0,24–0,38	-	0,34	0,34	0,38	-
3	Температура продуктов сгорания	°С	500–600	450–650	35	600	600	600	35
4	Удельный расход: - воздуха	нм ³ /т	2000	1015–1250	-	1280	920	1140	1480
	- природного газа - электроэнергии	нм ³ /т кВт-ч/т	30–50 34	19–25 75–61	- 275	29 75	20,9 54	19 61	- 136
5	Крупность исходного материала, мм	мм	25–0	0,2	0,2	5–0	0,5–0	до 1	до 1
6	Производительность	т/ч	4,0	1,8–2,2	1,2	1,8	2,5	2,2	1,8
7	Дисперсность продукта: - остаток на сите R , %	%	$R_{40}=5,2-9,7$	$R_{60}=0,5$	$R_{60}=0,5$	$R_{60}=1$	$R_{60}=2$	$R_{60}=19,8$ $R_{100}=4,0$	$R_{60}=21,5$ $R_{100}=1,5$
	- удельная поверхность $S_{уд}$	м ² /г	До 1,15	0, 23	0,24	0,26	0,22	0,24	0,25

Примечания. ПС – продукты сгорания природного газа; ХВ – холодный сжатый воздух.

*Волгоградский керамический завод.

**Уфимский завод текстильного стекловолокна.

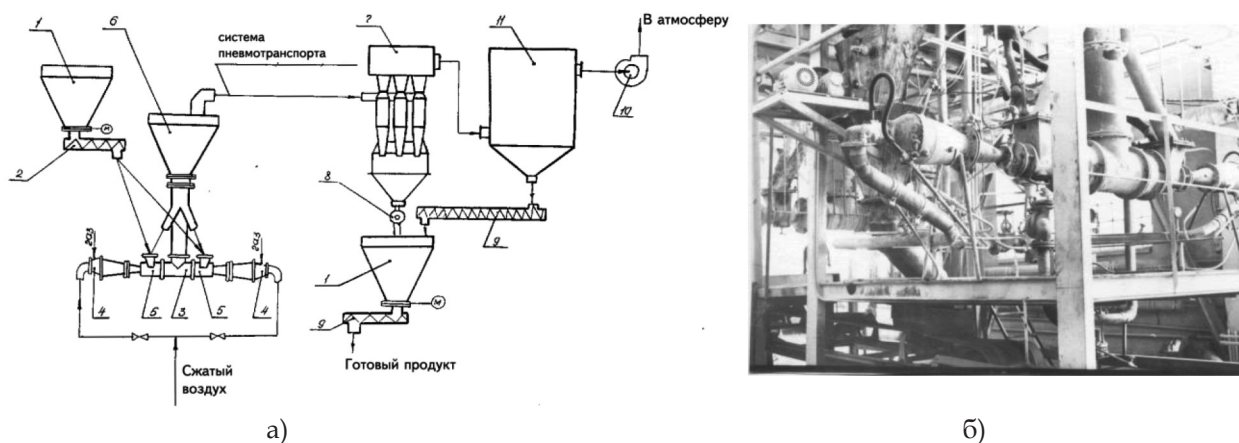


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) промышленной газоструйной установки: Вольногорского горно-металлургического комбината:

- 1 – бункер; 2 – питатель-дозатор; 3 – помольная камера; 4 – камеры сгорания; 5 – инжекторы;
- 6 – классификатор; 7 – блок циклонов-пылеосадителей; 8 – вакуум-дозатор; 9 – дозатор продукта;
- 10 – вентилятор; 11 – блок фильтров-пылеуловителей

производительностью 20, 200 и 2000 кг/ч, обеспечивает получение микронизированных порошков высокой чистоты (микрочастицы продукта – овализованной формы). По заключению ЦЗЛ ВГМК при использовании разгонных устройств из циркониевой керамики привнос примесей в продукт исключается. Опытные партии микронизированного концентрата (до 800 кг) были получены на промышленной газоструйной установке производительностью 200 кг/ч, действующей в условиях стекольного завода «ЭКМА» (г. Вольногорск). Измельченный продукт получен в циклоне («Ц») и фильтре («Ф») с соотношением масс в диапазоне «Ц»/«Ф» = 76–87/24–13.

Согласно расчетам производство на ВГМК микропорошков циркона в объеме 3000 т в год будет обладать высокорентабельным уровнем, поскольку годовая прибыль от реализации микропорошков на мировом рынке может составить десятки миллионов гривен за счет повышения дисперсности в 6–10 раз (от 60 до 6–10 мкм) и оптовой цены в 2,5 раза.

В табл. 2 показаны характеристики микропорошков из других видов минерального сырья, полученных струйным методом на двух уровнях дисперсности (пылеосаждение в циклоне и фильтре): средний размер d частиц удельная поверхность $S_{уд}$ продукта, содержание $\beta_{5\mu}$ фракций менее 5 мкм.

Процесс диспергирования в установке 1,5–2,2 т/ч получил практическое применение для подготовки фосфорного шлака и песка в производстве облицовочной керамической плитки на предприятиях керамической отрасли (Волгоградский завод), текстильного стекловолокна (Полоцкий, Северодонецкий, Уфимский заводы), на Руставском химическом

заводе (измельчение электролитической двуокиси марганца [5–10]. Максимальный размер частиц продуктов составлял 40–60 мкм, средний размер – 15–20 мкм.

Применение газоструйного способа обосновано на уровне промышленной апробации технологий обогащения талько-магнезитов Правдинского месторождения, а также экспериментальными исследованиями дообогащения марганцевых концентратов Никопольского месторождения, доизвлечения марганца из отходов Марганецкого ГОКа при получении высокодисперсных абразивных порошков карбидов кремния и бора (ОАО «Запорожский абразивный комбинат»), диоксидов циркония и титана.

Таблица 2

Характеристики дисперсности микропорошков струйного измельчения

Вид микропорошка		d , мкм	$\beta_{5\mu}$, %	S , см ² /г
Цирконовый концентрат	Ц	3,6–4,0	72–99,9	5600–7790
	Ф	1,0–1,4	92–100	9660–9770
Синтетические алмазы	Ц	3–5	74–85	8830–18150
	Ф	0,6–1,6	99–100	23060–30070
Диоксид циркония	Ц	2–4	70–75	6500–11500
	Ф	1,0–1,5	95–98	16500–17800
Микротальк	Ц	4–6	60–70	9470–11550
	Ф	1–3	98–100	14200–14600
Технический мел	Ц	2,0–3,6	66–98	8040–15470
Карбид кремния	Ц	8,8–16,6	5,4–13,3	1025–1740
	Ф	5,9–6,6	32,5–44,0	2410–4250
Карбид бора	Ц	5,8–6,5	29,0–37,5	3800–4280
Электрокорунд	Ц	8–12	8–21	1300–2000
Глина	Ц	4,5–5,5	97–99	4640–5250
Железная руда (K ₂ Z) Полтавского ГОКа	Ц	5–40	5–30	2900–3200

Примечание. Ц – продукт циклона, Ф – продукт фильтра.

Зависимость удельного расхода q энергоносителя от производительности G струйной установки показана на рис. 2. Для использования опытных данных в прогнозе энергозатрат при изменении дисперсности предложены формулы (коэффициент корреляции $r = 0,97$):

$$q = (48,65 + 0,98 G) / (1 + 0,298 G) \text{ или } q = 10^{1,7} / \sqrt{G}. \quad (4)$$

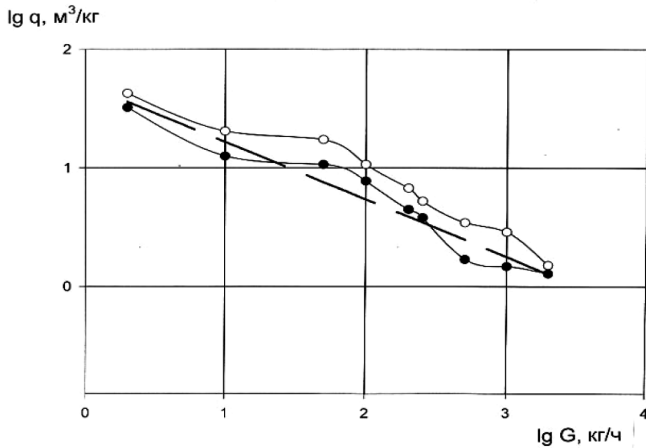
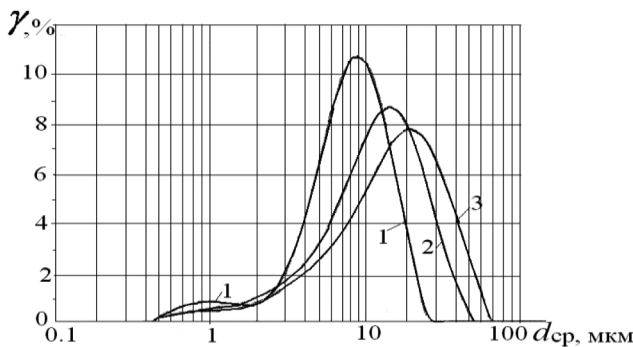


Рис. 2. Зависимость удельного расхода энергоносителя от производительности газоструйной установки:
 о максимальная; • минимальная; - - расчетная величина по формуле: $q = 10^{1,7} / \sqrt{G}$; $r = 0,97$ (для минимального уровня q)

Расчеты показали, что увеличение типоразмера мельницы от 2 до 2000 кг/ч приведет к снижению энергоемкости ($\text{м}^3/\text{кг}$) более чем на порядок: $q_2/q_{2000} = 20,0/1,5 = 13,3$. Однако повышение дисперсности, например, до размера частиц $d_{\text{ср}} = 4 \text{ мкм}$ обусловит рост удельного расхода q в $20/4 = 5$ раз и составит величину q_{2000} для установки промышленного типоразмера: $q_{2000} = 1,5 \times 5 = 7,5 \text{ м}^3/\text{кг}$ продукта с $d_{\text{ср}} = 4 \text{ мкм}$. Экспериментально установлено, что, например, измельченный в струях шлак со средним размером частиц порядка $d_{\text{ср}} = 4 \text{ мкм}$ соответствует удельной поверхности продукта циклона $S_y \geq 0,6 \text{ м}^2/\text{г}$.



На рис. 3 показано изменение распределений по размерам частиц измельченного отвального шлака (а) и шамота (б) в различных режимах работы классификатора отбойно-вихревого типа (КОВ): частота вращения ротора $n = 200-2000 \text{ мин}^{-1}$.

Покажем влияние частоты n на дисперсность S_{yd} и количество тонких фракций β_{-10} в продуктах струйной установки (до 20 кг/ч):

(а) - шлак отвальный:

- 1 - $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $S_{yd} = 6198 \text{ см}^2/\text{г}$, $\beta_{-10} = 63,98 \%$;
- 2 - $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $S_{yd} = 5310 \text{ см}^2/\text{г}$, $\beta_{-10} = 40,34 \%$;
- 3 - $n = 700 \text{ мин}^{-1}$, $S_{yd} = 4262 \text{ см}^2/\text{г}$, $\beta_{-10} = 29,45 \%$;

(б) - шамот:

- 1 - $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, $S_{yd} = 4850 \text{ см}^2/\text{г}$, $\beta_{-10} = 34,24 \%$;
- 2 - $n = 700 \text{ мин}^{-1}$, $S_{yd} = 2546 \text{ см}^2/\text{г}$, $\beta_{-10} = 15,1 \%$;
- 3 - $n = 200 \text{ мин}^{-1}$, $S_{yd} = 1556 \text{ см}^2/\text{г}$, $\beta_{-10} = 12,38 \%$.

На рис. 4 отражены взаимосвязи показателей дисперсности: удельной поверхности S_{yd} (на приборе «MALVERN»), среднего размера d частиц, содержания тонких фракций (менее 5, 10 мкм) на примере циркона (а) и других материалов (б), измельченных в мельнице лабораторного типа (до 20 кг/ч). Средний размер частиц циркона в продукте циклона составляет $d = 3-5 \text{ мкм}$, максимальный $d_{\text{max}} = 6-12 \text{ мкм}$, в продукте фильтра соответственно $d = 1-1,4 \text{ мкм}$, $d_{\text{max}} = 5-6 \text{ мкм}$ (рис. 4а).

Проведены исследования измельчаемости струйным методом (УСИ-20, $P = 0,3 \text{ МПа}$, $G = 1,8-4,3 \text{ кг/ч}$, $n = 2500-5000 \text{ мин}^{-1}$) кварцевых песков различных месторождений (вольногорский, глуховецкий, турбовский, иранский, бразильский). Исходные материалы крупностью от 3-0,8 до 0,4-0,1 мм предоставлены ЧП «Квазар-Микро». Получены тонкодисперсные порошки с удельной поверхностью в диапазоне $S = 0,55-0,82 \text{ м}^2/\text{г}$.

Из графиков рис. 4б следует, что при удельной поверхности до 0,7-0,8 $\text{м}^2/\text{г}$ содержание наиболее тонких фракций (менее 10 мкм и менее 5 мкм) может составить соответственно: β_{-10} до 90 %; β_{-5} до 30 %. Из числа исследованных проб наиболее высокой измельчаемостью обладает песок

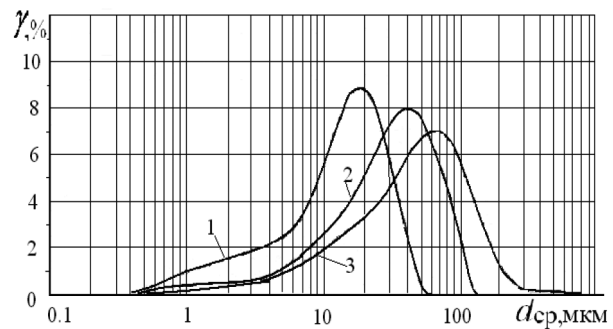


Рис. 3. Гранулометрия продуктов струйного измельчения шлака (а) и шамота (б) при различных режимах классификации:

- а) 1 - $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, 2 - $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, 3 - $n = 700 \text{ мин}^{-1}$;
- б) 1 - $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$, 2 - $n = 700 \text{ мин}^{-1}$, 3 - $n = 200 \text{ мин}^{-1}$

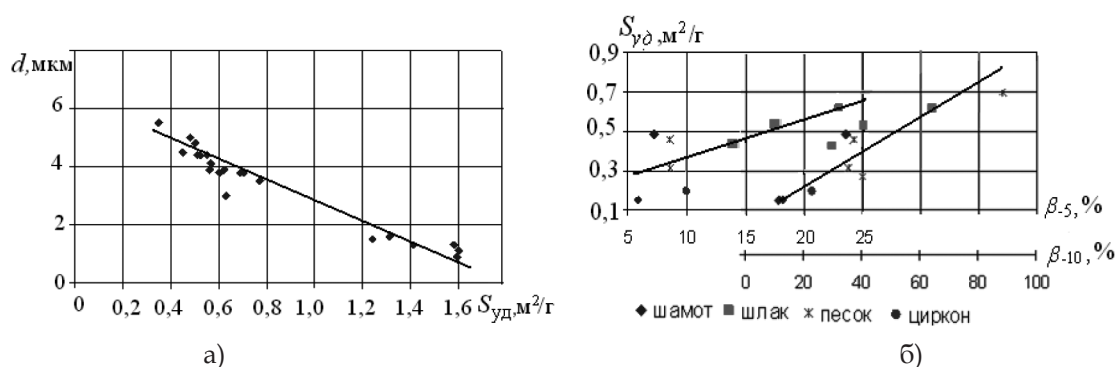


Рис. 4. Связь показателей дисперсности:

а) $S_{y\partial}$ (d); б) $S_{y\partial}$ (β_{-5}, β_{-10}) продуктов струйного измельчения цирконового концентрата; лабораторные данные

Ирана исходной крупностью 1–0,2 мм. При всех различиях свойств материалов (циркон, шлак, шамот, кварцевый песок) корреляционную связь $S_{y\partial} = f(\beta_{-10}, \beta_{-5})$ в диапазоне $\beta_{-5} = 5–25\%$ и $\beta_{-10} = 10–90\%$ можно признать практически линейной.

На рис. 5 приведены промышленные данные показателей дисперсности измельченного цирконового концентрата.

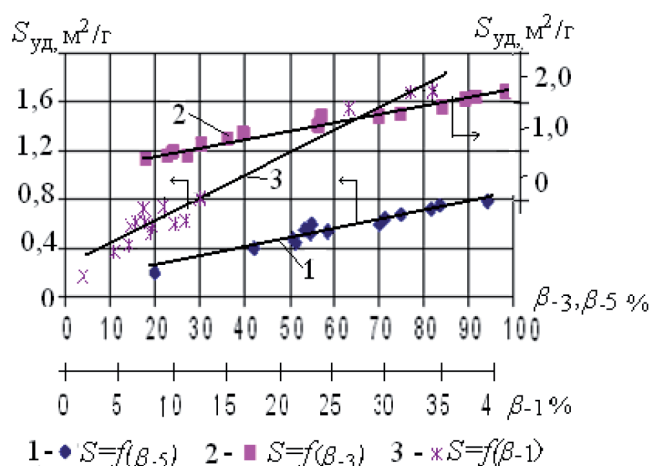


Рис. 5. Зависимости удельной поверхности измельченного цирконового концентрата от содержания ($\beta_{-5}, \beta_{-3}, \beta_{-1}$) фракций (менее 5, 3, 1 мкм); промышленные данные

В промышленных экспериментах (рис. 5) диапазон дисперсности циркона в продукте циклона (1) составил $S_{y\partial} = 0,3–0,8 \text{ м}^2/\text{г}$, продукта фильтра (2) – $S_{y\partial} = 1–2 \text{ м}^2/\text{г}$ при соотношении массы продуктов циклона и фильтра, составившем 80–90 % / 20–10 %. Подтверждается наличие линейной корреляционной связи удельной поверхности $S_{y\partial}$ продуктов струйного измельчения с содержанием в них тонких фракций (менее 1 и 5 мкм) в диапазоне: $S_{y\partial} = 0,3–2 \text{ м}^2/\text{г}$, $\beta_{-5} = 20–95\%$, $\beta_{-1} = 2–35\%$. Полагаем, что основу оценки диспергируемости материалов струйным методом могут составить различия показателей $S_{y\partial}, d, \beta_{-10}, \beta_{-5},$

β_{-3}, β_{-1} для продуктов, полученных в идентичных условиях измельчения и классификации.

Приведем ряд практических рекомендаций по улучшению свойств диспергированного в струях сырья и качества продуктов его переработки.

Например, в огнеупорном производстве добавка в технологический процесс 30–45 % фракции менее 40 мкм, полученной струйным измельчением *технического глинозема (или муллито-корундового шамота)*, обеспечивает повышение прочности изделий на 33 %.

В Днепропетровской области открыто и изучено Правдинское месторождение талько-магнезитов, которое может составить основу для развития отечественной *огнеупорной промышленности*. Запасы сырья, разведанного Новомосковской комплексной геолого-разведочной экспедицией (КГРЭ), составляют до 200 млн т. В переработку талько-магнезитов включено использование газоструйной технологии [2; 14]. Последняя обеспечила тонкое измельчение сырья, избирательное раскрытие основных минералов (магнезита и талька), пневматическую сепарацию и раздельное пылеосаждение талькового и магнезитового продуктов.

Опытные партии магнезиального концентрата были испытаны в Украинском научно-исследовательском Институте огнеупоров (УНИИО) и на Пантелеймоновском огнеупорном заводе с положительными результатами на пригодность в форстеритовом производстве. Результаты оценки термомеханических свойств форстеритовых изделий показали их соответствие требованиям ГОСТа на форстеритовые огнеупоры. Опытный кирпич в количестве 2 т был изготовлен на оборудовании завода УНИИО, испытан в насадке регенератора мартеновской печи Харьковского завода транспортного машиностроения и выдержал 288 плавов. Техничко-экономические расчеты дают основание считать технически возможной и экономически выгодной использование обогащенного магнезиального концентрата для про-

изводства форстеритовых огнеупоров *без добавки в шихту спеченного магнезита*.

При струйном доизмельчении тальковых концентратов 1-го и 2-го сортов (29,2 %) продукт из циклона соответствует удельной поверхности $\approx 0,8 \text{ м}^2/\text{г}$, продукт фильтра – $1,42\text{--}1,46 \text{ м}^2/\text{г}$. Производительность газоструйной установки при измельчении до 74 мкм может составить до 4 т/ч, при диспергировании – до 2 т/ч (расход электроэнергии – до 75 кВт·ч/т, расход природного газа порядка $19\text{--}25 \text{ нм}^3/\text{т}$) (табл. 1).

По отечественным и зарубежным исследованиям известно, что применение диспергированного талька (менее 20 мкм) с удельной поверхностью порядка тысяч $\text{см}^2/\text{г}$, называемого *микротальком* (МТ), улучшает реологические свойства красок, атмосферостойкость, «укрывистость» лакокрасочной продукции.

Испытаниями *струйного микроталька* подтверждено соответствие всех показателей нормам производства лакокрасочной продукции (грунты, ВДК, эмали ПФ-218). При стабильном качестве продукции возможно снижение энергозатрат в технологии Днепропетровского лакокрасочного завода.

Другими важными направлениями применения микроталька могут быть резинотехническая, литейная, керамическая, кабельная, пластмассовая отрасли, производство бумаги и картона, поливинилхлоридных изделий, огнестойких волокнистых плит, электроизоляционных материалов, тонких (порядка 40 мкм) полиэтиленовых пленок для оборонной промышленности. Например, добавление кабельного микроталька в изоляционную резиновую смесь улучшает ее физико-механические и электроизоляционные свойства.

Перечислим области и условия применения, диапазон рациональной дисперсности и степени механоактивации порошков струйной технологии, технологические и технико-экономические эффекты использования предлагаемого направления диспергирования.

Результаты проведенных исследований позволяют считать актуальным использование *талькового сланца Кривбасса* (отходов переработки руды на ГОКах) для развития отечественной сырьевой базы *лакокрасочных материалов*. Например, при измельчении в струях удельная поверхность продукта циклона составила $S=0,95\text{--}1,15 \text{ м}^2/\text{г}$, продукта фильтра $S=2,16 \text{ м}^2/\text{г}$.

Совместная научно-исследовательская работа НГУ с Мариупольским металлургическим комбинатом (ОАО «ММК им. Ильича») открыла актуальное направление утилизации отходов металлургического производства – доменных шлаков путем тонкодисперсного измельчения в струях

[12; 13]. По заключению В. П. Кравченко при диспергировании в струях до размеров частиц менее 10 мкм достигается максимальная гидратация вяжущего вещества шлака с увеличением гидравлической активности и затем прочности изделий на его основе. При струйном измельчении *доменного шлака* до удельной поверхности $S_{y0}=0,6\text{--}0,9 \text{ м}^2/\text{г}$ продукт циклона содержит порядка 100 % фракции менее 10 мкм со средним размером частиц менее 4 мкм. Согласно опытным данным, при удельной поверхности *струйного шлака* $S_{y0}=0,87 \text{ м}^2/\text{г}$ прочность на сжатие стандартного образца увеличивается до 30 МПа, т.е. в 2,1 раза по сравнению с измельчением в барабанной мельнице до $S_{y0}=0,4 \text{ м}^2/\text{г}$. Применение в *строительной индустрии* разработанной струйной технологии измельчения доменных шлаков позволит уменьшить расход клинкера в производстве цемента в 4–5 раз. Шлаки струйного помола можно рекомендовать также как бесклинкерное вяжущее вещество в производстве шлакоблоков и легкомарочных бетонов.

Результаты исследований показали также целесообразность струйного измельчения клинкера до $S_{y0}=0,4 \text{ м}^2/\text{г}$ для получения цементов высоких марок ($\sigma = 58,9 \text{ МПа}$). При этом уловленная в тканевом фильтре сверхтонкая фракция с удельной поверхностью $S_{y0}=1\text{--}2,1 \text{ м}^2/\text{г}$ пригодна в качестве микрозаполнителя бетонов для повышения их прочности, плотности и водостойкости при низких температурах и действии агрессивных сред.

Выводы

1. Полученные результаты позволяют рекомендовать технологию газоструйного измельчения для производства высокодисперсных порошков из любых твердых сыпучих материалов.

2. В работе выполнено обоснование некоторых вариантов применения газоструйного диспергирования для эффективной переработки сырья, концентратов и отходов обогатительной и металлургической промышленности.

3. Согласно теоретическим разработкам, экспериментальной проверке и накопленному производственному опыту предлагаем реализовать в промышленности Украины и в других странах применение газоструйной технологии получения *активированных высокодисперсных* продуктов. Например, полная замена привозного огнеупорного сырья на отечественное вполне реальна в Украине на базе Правдинского месторождения путем строительства рудника мощностью около 253 тыс. т пород, обогатительной фабрики производительностью порядка 100 тыс. т магнезимального концентрата и 40 тыс. т тальковых концентратов, а также цеха форстеритовых огнеупоров – порядка 65 тыс. т изделий в год.

Библиографический список / References

1. Пилов П. И. Технологические возможности струйных измельчителей / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, И. В. Верхоробина // ГИАБ. – 2007. – № 3. – С. 359–367.
Pilov P. I., Gorobets L. Zh., Verhorobina I. V. *Technological capabilities of jet grinders*. НИАВ, 2007, no. 3, pp. 359–367.
2. Горобец Л. Ж. Развитие научных основ измельчения твердых полезных ископаемых: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Л. Ж. Горобец; НГУ. – Д., 2004. – 35 с.
Gorobets L. Zh. *Development of scientific foundation for the solid minerals grinding*: abstract of Ph.D. dissertation, Mineral dressing, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine, 2004, 35 p.
3. Пилов П. И. Развитие и совершенствование конструкций струйных измельчительных установок / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. И. Мальченко, А. А. Лысенко // ЗКК. – 2009. – № 38 (79). – С. 59–68.
Pilov P. I., Gorobets L. Zh., Malchenko V. I., Lysenko A. A. *Development and improvement of designs of jet grinding installations*. ЗКК, 2009, no. 38 (79), pp. 59–68.
4. Горобец В. И. Новое направление работ по измельчению / В. И. Горобец, Л. Ж. Горобец. – М.: Недра, 1977. – 183 с.
Gorobets V. I., Gorobets L. Zh. *The new direction of work on grinding*. Moscow, Nedra, 1977, 183 p.
5. Горобец Л. Ж. Микророшки: технология и оборудование / Л. Ж. Горобец // Збагачення корисних копалин: наук.-техн. зб. – Дніпропетровськ, 1999. – № 4 (45). – С. 33–41.
Gorobets L. Zh. *Micropowders: technology and equipment*. Zbagachennya korisnyh kopalin. Dnipropetrovsk, 1999, no. 4 (45), pp. 33–41.
6. Исследование реакционной способности механически активированного кварцевого песка / Л. Ж. Горобец, И. М. Юрьевская, В. Г. Корсаков, Т. Л. Вдовина // Журн. прикл. химии. – 1986. – № 1. – С. 187–190.
Gorobets L. Zh., Yurievskaya I. M., Korsakov V. G., Vdovina T. L. *Study of the reactivity of mechanically activated quartz sand*. Zhurn. on chemistry, 1986, no. 1, pp. 187–190.
7. Куксенко В. С. Микромеханика разрушения материалов: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / В. С. Куксенко; Ин-т высокомолек. соед. – Л., 1977. – 36 с.
Kuksenko V. S. *Micromechanics of the destruction of materials*: abstract of dissertation. Dr. Phys.-Mat. Sciences. L., 1977, 36 p.
8. Бовенко В. Н. Синергетические эффекты и закономерности релаксационных колебаний в состоянии предразрушения твердого тела: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.07 / МИЭМ. – М., 1990. – 30 с.
Bovenko V. N. *The synergetics effects and conformities to law of relaxation vibrations in a state of pre-destruction of solid*, abstract of Ph.D. dissertation, Phys.-Mat. Sciences. Moscow, Russia, 1990, 30 p.
9. Горобец Л. Ж. Определение зависимости плотности энергии от размера разрушения / Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко // ФТПРПИ. – 1986. – № 5. – С. 109–111.
Gorobets L. Zh., Bovenko V. N. *Determination of energy closeness dependence from the size of destruction*. FTPRPI, 1986, no. 5, pp. 109–111.
10. Бовенко В. Н. Дискретно-волновая природа диспергирования / В. Н. Бовенко, Л. Ж. Горобец // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 1. – С. 7–9.
Bovenko V. N., Gorobets L. Zh. *Discrete-wave nature of dispersion*. Science Bulletin of NSU, 2008, no. 1, pp. 7–9.
11. Горобец Л. Ж. Результаты акустоэмиссионного мониторинга эволюции и эффектов диспергирования / Л. Ж. Горобец, И. В. Верхоробина // Обогащение полезных ископаемых: научн.-техн. сб. – Днепропетровск, 2003. – Вып. 18 (59). – С. 41–47.
Gorobets L. Zh., Verhorobina I. V. *Results of acoustic emission monitoring of evolution and dispersion effects*. Mineral processing. Dnepropetrovsk, 2003, vol. 18 (59), pp. 41–47.
12. Патент Украины № 18575, С04В 7/147. Способ подготовки гранулированного доменного шлака / В. П. Кравченко, П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. В. Климанчук, В. А. Струтинский, В. И. Трубников. – Опубл. в бюл. 15.11.2006, № 11.
Kravchenko V. P., Pilov P. I., Gorobets L. Zh., Klimanchuk V. V., Strutinsky V. A., Trubnikov V. I. Patent of Ukraine No. 18575, CBV 7/147. *Method of preparing granulated blast furnace slag*. Bul. 11/15/2006, no. 11.
13. Кравченко В. П. Тонкодисперсно подрібнення доменних шлаків у технології в'язучих матеріалів: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. П. Кравченко; НГУ. – Д., 2012. – 35 с.
Kravchenko V. P. *Fine-dispersed grinding of blast furnace slags in the technology of adhesive materials*: abstract of Ph.D. dissertation Tech. Sciences. Dnipropetrovsk, 2012, 35 p.
14. Горобец Л. Ж. Разработка технологии переработки огнеупорного сырья Украины / Л. Ж. Горобец, Т. Ю. Машкова // Збагачення корисних копалин / НГУ. – Дн-ск, 2017. – № 65 (106). – С. 14–23.
Gorobets L. Zh., Mashkova T. Yu. *Development of technology for processing of refractory raw materials of Ukraine*. Enrichment of minerals. Dnipropetrovsk, 2017, no. 65 (106), pp. 14–23.

Мета. Обґрунтування напрямів ефективної переробки шляхом диспергування продуктів і відходів збагачувальної та металургійної промисловості.

Методика. Дослідження матеріалів методом струменевого диспергування, оцінка показників дисперсності і поверхневої активності порошків потенціометричним методом і на приладі фірми «MALVERN» (Великобританія).

Результати. Теоретично обґрунтовано і підтверджено промисловими експериментами способи і режими диспергування в струменях, діапазони раціональної дисперсності продуктів, встановлено показники і напрями використання газострумних технологій. Отримано техніко-економічні дані про роботу газострумних установок промислового типорозміру при диспергуванні цирконового концентрату, металургійного і фосфорного шлаку, талькомагнезитів, скляного піску.

Наукова новизна. З позиції фізики руйнування встановлено провідні фактори підвищення ефективності диспергування і ступеня механоактивації продуктів газострумним методом. Зроблено обґрунтований вибір технологічних варіантів використання газострумних установок для ефективної переробки сировини і відходів збагачувальної та металургійної промисловості України.

Практична значущість. Згідно з теоретичними розробками, експериментальній перевірці та накопиченому виробничому досвіду рекомендується ряд напрямів технологічного застосування активованих високодисперсних матеріалів. Переробка диспергованих продуктів талькомагнезитів Правдинського родовища дозволить реалізувати заміну привізної вогнетривкої сировини на вітчизняну за практично безвідходною технологією.

Ключові слова: диспергування в струменях, концентрати, відходи, питома поверхня, механоактивація, мікропорошки, технології переробки.

Purpose. Justification of the directions of efficient processing by dispersing products and waste of the concentrating and metallurgical industries.

Methodology. Investigation of materials by the method of jet dispersion, evaluation of indicators of dispersion and surface activity of powders by the potentiometric method and on the device of the company MALVERN (Great Britain).

Findings. The methods and modes of dispersion in jets, the ranges of rational dispersion of products are theoretically substantiated and confirmed by industrial experiments, the indicators and directions for the use of gas-jet technology are established. Technical and economic data were obtained on the operation of gas-jet units of the projected size in dispersion of zircon concentrate, metallurgical and phosphoric slag, talc-magnesite, and glass sand.

Originality. From the position of the physics of destruction, the leading factors of increasing the efficiency of dispersion and the degree of mechanical activation of products by the gas-jet method were established. Produced a reasonable choice of technological options for the use of gas-jet plants for the efficient processing of raw materials and waste processing and metallurgical industry of Ukraine.

Practical value. According to theoretical developments, experimental verification and accumulated production experience, a number of technological applications of activated highly dispersed materials are recommended. The re-processing of dispersed talc-magnesite products from the Pravdinskoye deposit will allow the replacement of imported refractory raw materials with the one that has been taken for using practically non-waste technology.

Key words: dispersion in jets, concentrates, waste, specific surface, mechanical activation, micropowders, processing technologies.

Рекомендована к публикации
д. т. н. В. П. Надутым

Поступила 05.01.2019

