

Д. Т. Н. С. Я. Давыдов (✉)¹, Д. Х. Н. Р. А. Апакашев¹,
Д. Т. Н. В. С. Кийко², К. Т. Н. В. Н. Корюков²

¹ ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия

² ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 622:686:622.355.1

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СХЕМЫ ПНЕВМОТРАНСПОРТА ИЗВЕСТКОВОЙ ПЫЛИ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОЧАСТИЦЫ, В ОАО «СЕРОВСКИЙ ЗАВОД ФЕРРОСПЛАВОВ»

Дано описание схемы пневмотранспорта известковой пыли, содержащей наночастицы, на Серовском заводе ферросплавов. Представлена морфология частиц высокообожженной извести, содержащей наночастицы. Указаны рекомендации по обеспечению стабильной работы системы пневмотранспорта и дополнительному измельчению известковой пыли.

Ключевые слова: пневмотранспорт, известковая пыль, наночастицы, электрофильтры, пылепроводы, струйный насос.

Производство извести для собственных нужд Серовского завода ферросплавов началось с 1962 г. в цехе обжига известняка проектной мощностью 210 тыс. т в год [1]. В настоящее время высокообожженная известь производится на трех вращающихся обжиговых печах для собственного производства завода и используется при производстве рафинированного феррохрома.

Для замены изношенного оборудования по улавливанию пыли высокообожженной извести в 2014 г. была обследована работа всей схемы газового тракта вращающихся печей Серовского завода ферросплавов. По данным ОАО «Галоген» от 28.04.2004 г., известковая пыль содержит не менее 60 % CaO, а также MgO и кристаллический SiO₂ от 2 до 10 %. В соответствии с ТУ 14-140-30-04 известковая пыль может быть использована в сельском хозяйстве для известкования кислых почв, в строительстве для приготовления растворов, в горнорудной промышленности в качестве профилактического средства против смерзания материалов и в других отраслях. По данным замеров цеха обжига извести от 24.03.2014 г., пыль после электрофильтров ЦН-15 содержит 0,043 г/м³ CaO и его карбоната. Фактический выброс вредных веществ не превышает 1,568 г/с. В настоящее время такая пыль используется частично. Ее физико-химические и техно-

логические свойства исследованы недостаточно. В этом плане исследования различных свойств такой пыли являются особенно актуальными.

Авторами настоящей статьи был исследован химический состав известковой пыли с

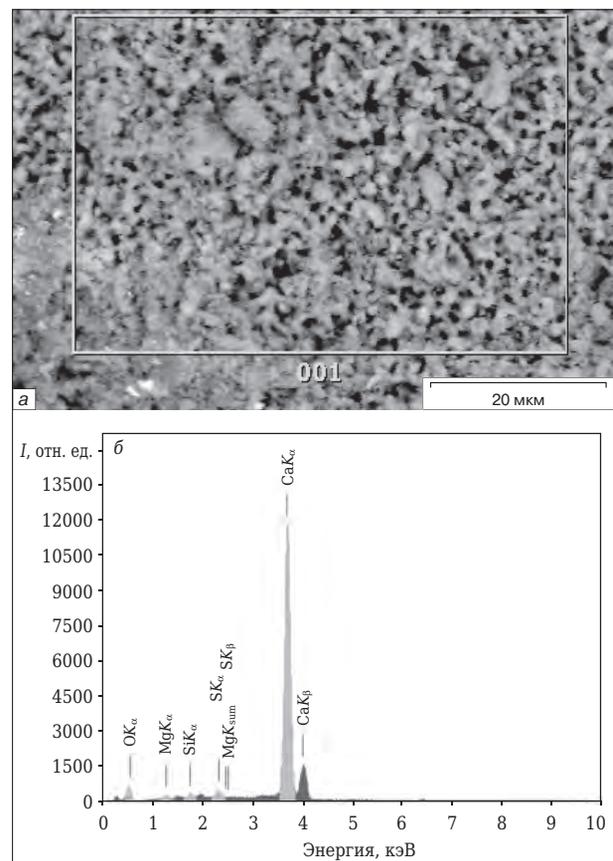


Рис. 1. Результаты рентгеновского микроанализа известковой пыли: а — область микроанализа (001); б — энергодисперсионные линии обнаруженных элементов

✉
С. Я. Давыдов
E-mail: davidovtrans@mail.ru

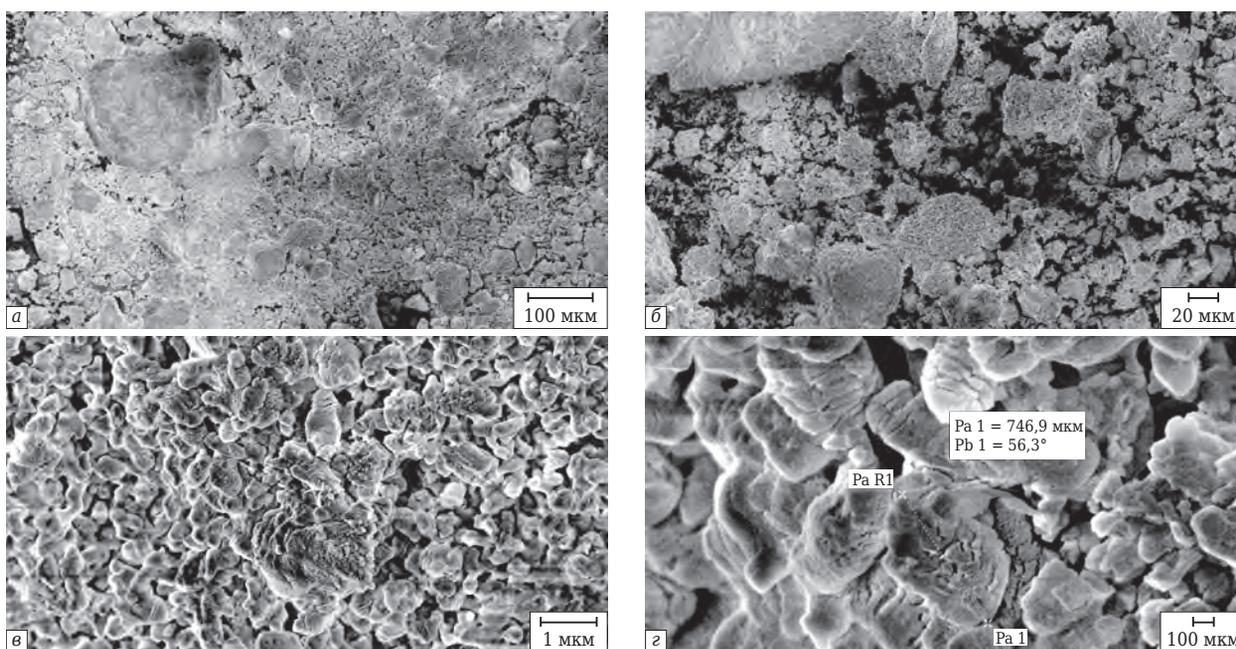


Рис. 2. Микрофотографии известковой пыли при различном увеличении

помощью сканирующего электронного микроскопа JSM JEOL 6390LA, оборудованного приставкой для рентгеновского микроанализа. На рис. 1 показаны типичные результаты микроанализа элементного состава пыли. Результаты, воспроизводимые при произвольном выборе области микроанализа, отражают состав известковой пыли в целом. По данным рентгеновского микроанализа массовая доля основных компонентов исследованной пыли — кальция и кислорода составляет 70,03 и 27,45 % соответственно. В качестве примесных элементов присутствуют магний, кремний и сера. При этом общее количество примесей не превышает 3 %.

На рис. 2 показана морфология частиц пыли высокообоженной извести. Изображения получены на растровом электронном микроскопе «ZeissSigma VP» при ускоряющем напряжении 3 кВ с регистрацией на детекторе вторичных электронов, встроенном в колонну микроскопа (In-lensdetector). Для предотвращения заряда поверхности порошкообразный образец наносили на проводящий углеродный скотч и с применением аппарата «Quorum Q150T ES» методом магнетронного распыления на его поверхность напыляли тонкий слой золота толщиной 5 нм. Из рис. 2 видно, что основной размер частиц пыли варьируется в пределах 50–300 нм. Частицы не имеют естественной огранки, при этом преобладает овальная форма без острых углов и граней. Важно, что отдельные частицы консолидированы в плотные конгломераты, не разрушающиеся при транспор-

тировании пыли. По результатам проведенных электронно-микроскопических исследований размер конгломератов, состоящих из большого количества мелких микрокристаллов, колеблется в широких пределах. Линейный размер наиболее крупных образований достигает 25–30 мкм. Пыль такой крупности представляет собой аэрозоль, для нее характерны слеживаемость и ограниченная подвижность частиц, что создает проблемы, связанные с улавливанием и выгрузкой из бункеров, дозированием и транспортированием. Пыль этого класса не имеет стабильного угла естественного откоса и плохо поддается псевдооживлению. Однако при повышенных температурах (100–150 °С) транспортабельность этой пыли улучшается [2–7].

На процессы транспортировки и складской переработки насыпных грузов (материалов) влияют их характерные свойства: размер частиц, плотность, насыпная плотность, коэффициент внутреннего трения, коэффициенты трения о твердые несущие поверхности, угол естественного откоса, влажность, подвижность и связность частиц, слеживаемость, абразивность, форма частиц. Известные вакуумные системы могут применяться для пневмотранспорта различных материалов на расстояние до 100 м с концентрацией пыли до 40 кг/кг и температурой до 300 °С. Производительность вакуумных систем может достигать 50 м³/ч. Преимущества вакуумной системы — малые габариты приемных устройств и простота обслуживания, недостатки — большие удельные расходы электроэнергии и потери тепловой

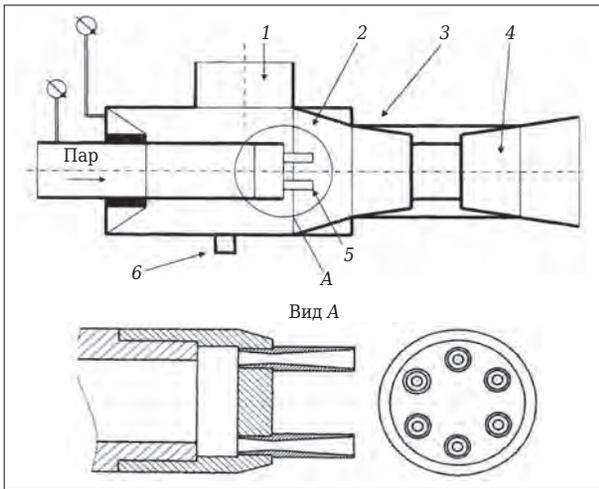


Рис. 3. Общий вид парового эжектора: 1 — воздух из циклонов; 2 — направляющий конфузор; 3 — корпус смесительной камеры; 4 — выходной конфузор; 5 — сопла; 6 — патрубок для слива конденсата

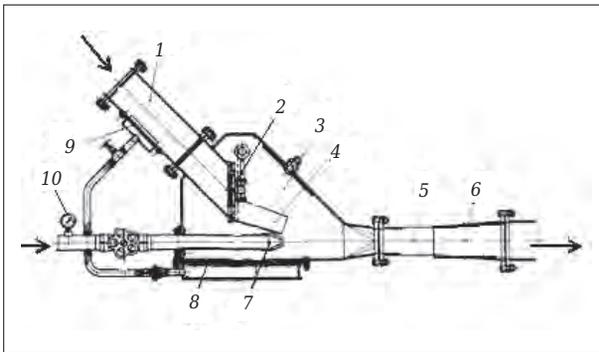


Рис. 4. Струйный насос с интенсифицирующей камерой: 1 — загрузочный патрубок; 2 — обратный клапан; 3 — интенсифицирующая камера; 4 — криволинейный лоток; 5 — смесительная камера; 6 — диффузор; 7 — сопло; 8 — аэроднище; 9 — аэрирующее устройство; 10 — манометр

энергии при работе паровых эжекторов, имеющих обычно невысокую эффективность. В зависимости от размеров частиц и плотности перемещаемого материала применяют скорость воздуха от 8 до 35 м/с [2–7].

Для своевременного удаления пыли из зон ее скопления (пылевые камеры, бункера циклонов подогревателя, бункера циклонов 1-й ступени очистки дымовых газов, бункера электрофильтров) используется система вакуумного пневмотранспорта, включающая следующее оборудование: регулирующие насадки в зонах скопления пыли для подачи вместе с воздухом в пылепровод; пылепроводы с установленной на них запорной арматурой; две осадительные камеры; циклоны ЦН-15-600 по 2 единицы на каждой осадительной камере; трубопроводы воздуха, очищенного через циклоны, с запорной арматурой; три паровых 6-сопловых

эжектора (рис. 3) для создания разрежения в системе за счет эжекции пара с температурой 200–220 °С с расчетной производительностью 1000 кг/ч. В результате перемещения абразивной известковой пыли с температурой 100–150 °С образовывались многочисленные сквозные отверстия в электрофильтрах и бункерах, через которые происходили подсосы атмосферного воздуха. Наблюдались частые сбои в работе всей системы пневмотранспорта при налипании материала на стенки трубопровода, особенно в коленах и поворотах. Работа всей системы не обеспечивает заданные технические параметры производственных процессов.

Для конкретных заводских условий работы Серовского завода ферросплавов предлагается использовать струйные насосы с интенсифицирующей камерой СН-2 ООО «Строительные машины» (рис. 4). Параметры струйного насоса представлены в таблице [5, 7]. Струйные насосы [7–9] имеют простую конструкцию, небольшие габариты, обеспечивают непрерывную подачу материала. В струйных насосах отсутствуют трущиеся и вращающиеся элементы, насосы имеют высокую износостойкость и надежность в работе. Однако у них сравнительно невысокий коэффициент полезного действия, поэтому повышение производительности аппарата зависит от правильно выбранных конструктивных и технологических параметров.

При превышении аэродинамического сопротивления транспортного трубопровода сопротивления слоя материала, находящегося в бункере, могут происходить прорывы сжатого воздуха из струйного насоса в бункер, что ухудшает условия поступления материала в насос, увеличивает расход сжатого воздуха и уменьшает дальность подачи материала. Для устранения прорыва воздуха в струйном насосе используется обратный клапан или роторный питатель. Обратный клапан струйного насоса перекрывает загрузочное отверстие, как только давление в интенсифицирующей камере превышает 0,05 МПа, и вновь начинает работать в колебательном режиме, как только давление опускается ниже 0,05 МПа. В процессе наладки намеренно забивали транспортный трубопровод. Не прекращая подачи материала из силоса, прекращали в течение 55 с подачу воздуха к соплу струйного насоса, вследствие чего в трубопроводе образовывалась пробка материала. Сразу после возобновления подачи воздуха в сопло давление в камере возрастало до 0,15 МПа, а обратный клапан перекрывал отверстие загрузочного патрубка на время бо-

Характеристика струйных насосов разных производителей

Показатели	ООО «Строительные машины»	Волгоградское отделение института «Гидропроект»
Производительность, т/ч:		
техническая	25	40
средняя	16,5	–
Дальность подачи (приведенная), м	150	150
Высота подачи, м	25	30
Диаметр транспортного трубопровода, мм	150	150
Давление сжатого воздуха, подводимого к насосу, МПа	0,2–0,4	0,3–0,4
Расход сжатого воздуха:		
м ³ /мин	10	20
м ³ /т	24	30
Масса, кг	212	450
Габаритные размеры, мм	2255×565×925	–

лее 100 с, прекращая тем самым возможность прорыва воздуха в силос.

Опыт по конструированию и эксплуатации эжекторов для струйных мельниц и насосов показал, что производительность (тяга) эжектора и его энергетические показатели во многом определяются формой сопла и режимом его работы. Наличие диффузора увеличивает КПД установки в 1,7 раза. Струйный насос ООО «Строительные машины» снабжен лотком криволинейной формы, который позволяет равномерно распределять материал по периметру поперечного сечения воздушной струи, увеличивая тем самым непосредственный контакт подаваемого порошкового материала со струей сжатого воздуха, и подавать материал в направлении, близком к направлению струи транспортирующего воздуха. Струйные насосы, поставляемые с завода-изготовителя, имеют произвольную установку сопла. Площадь сечения в узкой части рассчитана для подачи материала на 150 м. Поэтому при получении насоса необходимо в зависимости от конкретной трассы определять требуемый диаметр сопла (в узкой его части на выходе) и изготавливать насадку сопла с расчетными размерами выходного отверстия. Кроме того, необходимо устанавливать сопло в оптимальное положение для данной трассы транспортировки.

Для наибольшей производительности эжектора применяют сверхзвуковые сопла, имеющие конфузур (сужение) до критического сечения в дозвуковой части сопла и конический диффузор (расширение) в сверхзвуковой части сопла. Сопла струйных насосов завода-изготовителя имеют высокие потери энергии на преодоление трения в канале и низкий коэффициент эжекции. Замена этих сопел на конструкцию, рекомендуемую в публикациях [5, 8], позволит добиться стабильной производи-

тельности, не зависящей от высоты слоя материала в бункере.

Представляется целесообразным заменить бельтинговую (фильтровальную) ткань аэроднища металлической беспровальной сеткой СД 200-08Х18Н10 по ГОСТ 3187–76, выпускаемой Магнитогорским метизным заводом (сетка саржевого переплетения двухсторонняя, предназначена для фильтрования, обезвоживания, сушки). Аэроднище состоит из двух перфорированных пластин 1 и 2 (рис. 5), между которыми установлена беспровальная фильтровальная сетка 3. Верхняя пластина 1 имеет живое сечение 4–5 %, нижняя пластина 2 около 20 %. Расход воздуха через перфорированное днище для пылевидного материала следует поддерживать соответствующим скорости потока на полное сечение днища — не более 0,05 м/с. Следует отметить, что полная оптимизация работы насоса, уточнение типоразмеров сопла и транспортного воздуховода возможны только при контроле расхода воздуха как основного (через сопло), так и аэрационного. Для этого необходимо установить на подводящих воздуховодах расходомерные устройства и приборы — диафрагмы, манометры.

Струйные насосы с диаметром транспортного трубопровода до 150 мм рассчитываются по известной методике [5, 7]. Расход V_{c1} ,

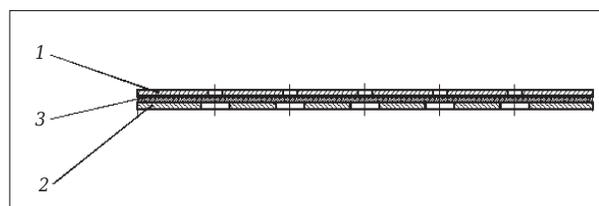


Рис. 5. Схема аэрационного элемента: 1 — верхняя пластина; 2 — нижняя пластина; 3 — фильтровальная сетка

кг/мин, эжектирующего сжатого воздуха, идущего на транспортирование материала:

$$V_{c1} = Q_c / (60\mu),$$

где Q_c — производительность установки, т/ч; μ — коэффициент массовой концентрации цемента в воздухе, принимаемый в зависимости от приведенной дальности транспортирования $L_{пр}$.

Значения μ в зависимости от $L_{пр}$ при высоте столба азрированного цемента в силосе, равной 7–8 м, приведены ниже:

$L_{пр}$, м.....	60	70	80	90	100
μ , кг/кг.....	36	33	30	27	25
$L_{пр}$, м.....	110	120	130	140	150
μ , кг/кг.....	24	23,5	23	22,5	22

Расход сжатого воздуха V_{c2} , кг/мин, необходимого для азрации материала в насосе:

$$V_{c2} = 2F_n,$$

где F_n — площадь пористой перегородки аэроднища, m^2 ; F_n можно найти по табличным данным [6] или по конструктивным соображениям.

Общий расход сжатого воздуха V , $m^3/мин$:

$$V = Q_c / (60\mu) + 2F_n.$$

Диаметр $D_{с.к}$ смесительной камеры, мм:

$$D_{с.к} = (0,60 \div 0,75) D_{тр},$$

где $D_{тр}$ — диаметр транспортного трубопровода, мм.

Длина смесительной камеры $l_{с.к}$, мм:

$$l_{с.к} = 4,5 D_{с.к}.$$

Длина диффузора l_d , мм:

$$l_d = (D_{тр} - D_{с.к}) / (2 \operatorname{tg} \alpha_d / 2),$$

где α_d — угол раскрытия диффузора; обычно принимают $\alpha_d = 6 \div 10^\circ$.

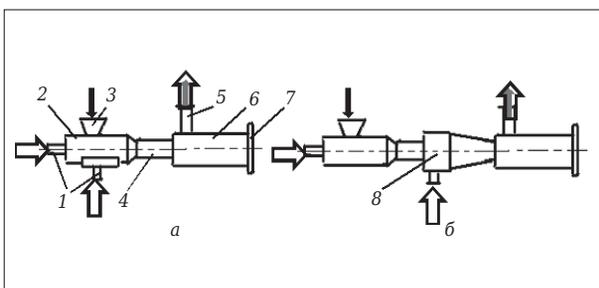


Рис. 6. Схема струйного измельчения с одноступенчатым (а) и двухступенчатым (б) эжекторами: 1 — подача сжатого воздуха; 2 — эжектор мельницы; 3 — питающий бункер материала; 4 — разгонная трубка; 5 — патрубок классификатора; 6 — помольная камера; 7 — сменная преграда; 8 — вторая ступень эжектора

Расстояние от сопла до смесительной камеры $l_{с.с}$, мм:

$$l_{с.с} = (3,6 \div 4,0) D_{с.к}.$$

Площадь сечения сопла в узкой его части на выходе F_c , mm^2 :

$$F_c = 0,025 V_{c1} \sqrt{RT/P_b},$$

где R — газовая постоянная для воздуха, $R = 287$ Дж/(кг · К); T — температура сжатого воздуха перед соплом, К; P_b — абсолютное давление сжатого воздуха перед соплом, МПа. Площадь сечения сопла в узкой его части на выходе, диаметр сопла в зависимости от давления и расхода сжатого воздуха можно найти по табличным данным [7].

В процессе проектирования вертикальные и криволинейные участки следует располагать ближе к концу материалопровода, т. е. на участках с повышенными скоростями, обеспечивающими более равномерную транспортировку смеси, и с меньшим для всей транспортной линии давлением. В начале трубопровода необходимо иметь горизонтальный участок по возможности большей длины для обеспечения разгона материала. При этом по невыгодности затрат энергии колена располагаются в следующем порядке: изменяющие направление движения потока с вертикального на горизонтальное; в горизонтальной плоскости; с горизонтального на вертикальное.

Для дополнительного измельчения порошков более эффективны и производительны струйные мельницы. Они обеспечивают тонкое измельчение порошков струями сжатого газа (воздуха, азота и т. д.) или перегретого пара, поступающими в рабочую камеру из сопла или из сопел со сверхзвуковой скоростью. Струйные мельницы ударного действия предполагают направление струи воздуха с частицами на преграду, например на диск из твердого сплава. В случае струйного измельчения с одноступенчатым и двухступенчатым эжекторами 2 частицы пыли разгоняются потоком сжатого воздуха и дробятся в результате удара о сменную преграду 7 (рис. 6).

В случае струйного измельчения встречными потоками сжатого воздуха внутри помольной камеры измельчаемые частицы участвуют в вихревом движении, испытывают многократные соударения. Пыль подается во встречно расположенные на одной оси сопла (эжекторы, см. рис. 3), к которым подводится сжатый газ под давлением. Через разгонные трубки частицы материала со скоростью в пределах 550 м/с летят навстречу друг другу и после соударения разрушаются. Измельченный материал пода-

ется в классификатор, откуда крупный продукт вновь поступает в эжекторы. Для предотвращения окисления в рабочих объемах струйной мельницы может создаваться инертная атмосфера. Современные струйные мельницы обеспечивают тонину помола от 0,7 до 100 мкм, что примерно соответствует среднему размеру частиц от 200 нм до 50 мкм. Диапазоны производительности составляют от единиц килограммов до нескольких тонн в час. Отличительными чертами струйных мельниц являются большой срок службы, возможность получения продукта высокой чистоты, обладающего большой удельной поверхностью.

Таким образом, на основании проведенных исследований установлено, что основной размер частиц пыли варьируется в пределах 50–

300 нм. Частицы не имеют естественной окантовки, при этом преобладает овальная форма без острых углов и граней. Отдельные частицы консолидированы в плотные конгломераты, не разрушающиеся при транспортировании пыли. Линейный размер наиболее крупных образований достигает 25–30 мкм. Представлены результаты обследования схемы улавливания и пневмотранспорта известковой пыли на Серовском заводе ферросплавов. Даны рекомендации по обеспечению стабильной производительности струйного насоса и дополнительному измельчению известковой пыли. Использование рекомендаций позволит уменьшить потери при транспортировании известковой пыли с увеличением ее выхода, а также получить дополнительную продукцию.

Библиографический список

1. Металлургические заводы Урала XVII–XX вв. : энциклопедия. — Екатеринбург : Академкнига, 2001. — 536 с.
2. **Давыдов, С. Я.** Особенности транспорта мелкодисперсных материалов / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, А. В. Катаев // Новые огнеупоры. — 2002. — № 3. — С. 59, 60.
3. **Давыдов, С. Я.** Утилизация пыли печей кальцинирования глинозема, содержащей наночастицы / С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев, В. Н. Корюков // Новые огнеупоры. — 2014. — № 8. — С. 10–13.
- Davydov, S. Ya.** Utilization of Alumina Calcining Furnace Dust Containing Nanoparticles / S. Ya. Davydov, R. A. Apakshv, V. N. Korukov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 291–294.
4. Выбор оборудования для перемещения и складирования глиноземной пыли и разработка технологии ее утилизации : отчет о НИР / ООИ «ВЕРА» – ОАО «БАЗ-СУАЛ» ; рук. работы С. Я. Давыдов. — Екатеринбург, 2000. — 154 с.
5. **Давыдов, С. Я.** Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. — 317 с.
6. **Давыдов, С. Я.** Особенности транспортабельности мелкодисперсных материалов / С. Я. Давыдов, А. В. Катаев, Г. Э. Вебер // Технологическое оборудо-

вание для горной и нефтегазовой промышленности : сборник докладов международной научно-технической конференции. Чтения памяти В. Р. Кубачека. — Екатеринбург : Уральская государственная горно-геологическая академия, 2002. — С. 99–110.

7. **Малевич, И. П.** Транспортировка и складирование порошкообразных строительных материалов / И. П. Малевич, В. С. Серяков, А. В. Мишин. — М. : Стройиздат, 1984. — 184 с.

8. **Давыдов, С. Я.** Проблемы использования пневмовинтовых насосов для перемещения насыпных грузов / С. Я. Давыдов, Н. П. Косарев, Н. Г. Валиев [и др.] // Новые огнеупоры. — 2013. — № 3. — С. 139–144.

Davydov, S. Ya. Problems with the Use of Pneumatic Screw Pumps to Transport Bulk Cargo / S. Ya. Davydov, N. P. Kosarev, N. G. Valiev [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 54, № 2. — P. 100–105.

9. **Пат. 2527635 РФ.** Устройство пневмотранспорта сыпучих материалов / Давыдов С. Я., Косарев Н. П., Валиев Н. Г., Симисин Д. И. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет». — № 2013115808 ; заявл. 08.04.2013 ; опублик. 10.07.2014. ■

Получено 27.01.15

© С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев, В. С. Куйко, В. Н. Корюков, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



07a09 June 2016
São Paulo Expo | São Paulo - SP - Brasil
Exhibition: 11 a.m to 8 p.m | Congress: 9 a.m to 6 p.m

EXPO ALUMINIO 2016 — международная выставка по алюминию

7–9 июня 2016 г.

г. Сан-Паулу, Бразилия

www.expoaluminio.com.br