

Д. т. н. С. Я. Давыдов<sup>1</sup> (✉), д. х. н. Р. А. Апакашев<sup>1</sup>, к. т. н. В. Н. Корюков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup> ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 666.862'022-13:666.9.022.59

## УЛАВЛИВАНИЕ НАНОРАЗМЕРНОЙ ФРАКЦИИ ЧАСТИЦ ГЛИНОЗЕМНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрено движение разноразмерных заряженных частиц пыли в электрофилт্রে. Отмечено, что разноразмерные заряженные частицы перед осаждением приобретают различную скорость движения. При этом траектории их движения существенно различаются своей крутизной, что позволяет обеспечить выделение наночастиц из общего пылевоздушного потока. Предложено устройство для улавливания наноразмерной фракции частиц пыли при пневмоподъеме сыпучих материалов глиноземного производства.

**Ключевые слова:** глиноземное производство, сыпучие материалы, пневмоподъем, наноразмерная фракция частиц, улавливание, съемные вставки, кулоновские силы, электроды.

Использование наноразмерных частиц в качестве модифицирующих (легирующих) добавок, а также в качестве индивидуального материала открывает новые возможности применения известных веществ. Так, использование нанопорошков для реализации нового комплекса функциональных свойств не имеет альтернативы при создании тугоплавких дисперсноупрочненных композиционных материалов. Результаты проведенных комплексных исследований [1] свидетельствуют о существенном влиянии добавок керамических наночастиц на свойства твердых сплавов WC-Co, WC-TiC-Co, TiC-Ni-Mo. Установлено, что модифицирование наночастицами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обеспечивает повышение эксплуатационной стойкости твердых сплавов в 1,3–4,0 раза, износостойкости в 1,6–2,0 раза, трещиностойкости в 1,8–2,0 раза, прочности на изгиб на 25–50 %. Отметим, что наноразмерные частицы глинозема также являются востребованным абразивным материалом, при использовании которого обеспечивается высокое качество декоративной обработки поверхности камня [2]. Однако широкому применению нанопорошков препятствует затратность процесса их получения.

С другой стороны, например, одной из технологических стадий процесса получения технического глинозема является обжиг во вращающихся барабанных печах гидроксида алюминия, выделяемого из алюминатных растворов. При этом дисперсность прокаливаемого материала значительно увеличивается, внутри печи образуется большое количество наноразмерной

глиноземной пыли. Частицы пыли увлекаются отходящими топочными газами и улавливаются электрофилтрами [3, 4].

Отметим, что наноразмерная пыль образуется при протекании различных процессов в печах для обжига. Так, высокообоженная известь ОАО «Серовский завод ферросплавов» производится на трех вращающихся печах [5, 6]. Исследования газового тракта вращающихся печей показали, что основной размер частиц пыли варьирует в пределах 50–300 нм.

Наноразмерные частицы пыли, образующейся в печах для обжига, имеют, как правило, округлую форму [5, 7]. Зарядка частиц в электрофилт্রে при коронном разряде осуществляется по двум механизмам: воздействием электрического поля (частицы бомбардируются ионами, движущимися в направлении силовых линий поля) и диффузии ионов. Первый механизм доминирует при размерах частиц более 0,5 мкм, второй — при размерах частиц менее 0,2 мкм. Для частиц диаметром 0,2–0,5 мкм эффективны оба механизма [8].

Под действием коронного разряда частицы приобретают заряд одного знака. Максимальный заряд достигается за доли секунды. Заряженные частицы двигаются под влиянием поля к осадительному электроду, на котором отдают заряд и оседают.

При этом разноразмерные заряженные частицы, находясь в электрофилт্রে, перед осаждением приобретают различную скорость движения. Дополнительное влияние на различие в скорости движения разноразмерных частиц оказывает тот факт, что распределение заряда частиц наиболее сильно зависит от их размера в диапазоне менее 200 нм [9]. В качестве примера на рис. 1 представлено распределение заряда частиц в диапазоне размеров от 1 до 1000 нм.



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

Представляет практический интерес использование различной скорости заряженных разноразмерных частиц для разработки эффективного метода выделения наноразмерной фракции частиц пыли. Это будет способствовать ее последующему рациональному использованию в качестве промышленного продукта с высокими потребительскими свойствами.

Известно, что время пребывания пылевоздушной смеси в электрофильтре обычно не превышает нескольких секунд. В течение этого времени на движение наиболее крупных частиц (радиусом более 100 мкм) основное влияние оказывает гравитационная сила, влияние кулоновской силы незначительно. Для более мелких частиц (радиусом около 10 мкм) гравитационная и кулоновская силы близки, а при дальнейшем уменьшении размеров частиц (до радиуса 1 мкм) влияние на их движение кулоновской силы возрастает. На движение наиболее мелких частиц (радиусом менее 0,1 мкм) гравитационная  $f_g$  практически не оказывает влияния и основной силой является кулоновская сила  $f_k$  [10].

Характеристики процесса движения микрочастиц в воздушной среде при температуре 10–30 °С под действием электростатического и гравитационного полей представлены в таблице.

При электроосаждении отношение кулоновской силы к силе тяжести для частиц небольших размеров (~0,1 мкм) значительно превосходит это отношение для более крупных частиц (см. таблицу). В связи с этим расчетные траектории движения разноразмерных частиц в области действия электрического поля различаются своей крутизной [10]. В результате образуются зоны преимущественного осаждения частиц того или иного размера (рис. 2). Благодаря этому можно осуществить процесс осаждения наночастиц, который не удастся провести за счет действия силы тяжести или центробежной силы.

Для практического решения задачи выделения наночастиц в настоящей работе создано универсальное устройство пневмотранспорта, обеспечивающее улавливание наночастиц в процессе движения сыпучего материала. Это устройство [11] пневмотранспорта для вертикального перемещения частиц сыпучих материалов содержит загрузочный питатель 1, установленный над патрубком 2 вертикального транспортного трубопровода 3 (рис. 3). В нижней части смесительной камеры 4 установлены патрубок 5 для подвода сжатого воздуха и пористая газораспределительная перегородка 6 [12–15]. В транспортном трубопроводе 3 рассредоточенно установлены поперечные перфорированные вставки 7 со своими фланцами 8. Кроме этого, вертикальный транспортный трубопровод 3 снабжен дополнительной съемной вставкой 9. Внутри съемной вставки 9 смонтирована система электродов (коронирующие и осадительные электроды) 10. Для

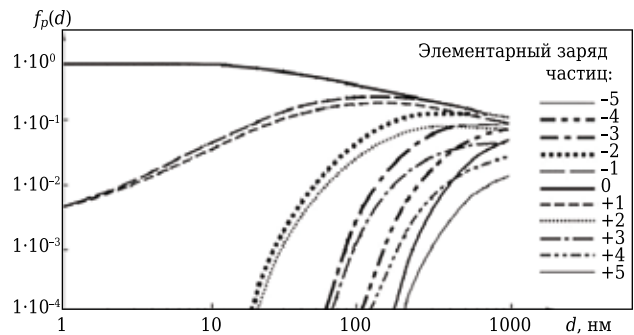


Рис. 1. Распределение заряда частиц в диапазоне размеров от 1 до 1000 нм [9]. Кривые рассчитаны по теории Фукса:  $f_p(d)$  — заряд частицы;  $d$  — размер частицы

**Характеристики процесса движения микрочастицы в воздушной среде [10]**

Показатели	Характерные значения сил, действующих на микрочастицы с радиусом, мкм			
	100	10	1,0	0,1
Заряд частицы $q$ (в элементарных зарядах $e$ , $e \approx 1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл)	$\sim 8 \cdot 10^5$	$\sim 9 \cdot 10^3$	$\sim 200$	20
Отношение кулоновской силы к силе тяжести $f_k/f_g$ :	0,14	1,6	40	2500
Скорость движения частиц, см/с, под действием:				
силы тяжести $w_g$	$\sim 270$	$\sim 27$	$\sim 0,2$	$\sim 0,003$
кулоновской силы $w_k$	$\sim 38$	$\sim 44$	10,0	7,0

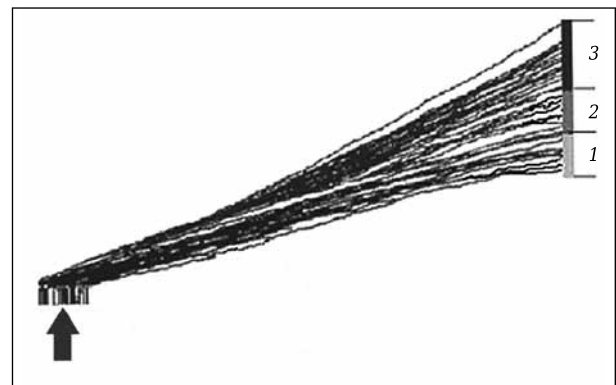


Рис. 2. Траектории движения частиц в электрофильтре: 1–3 — области осаждения частиц разноразмерных фракций

подпитки электроэнергией электродов 10 вставка 9 снабжена токопроводящими контактами 11. Таким образом, во вставку 9 входит комплект электродов 10 и токопроводящих контактов 11. Фланцы 12 снабжены токопроводящими выводами 13, подведенными к источнику постоянного тока. Изоляторы 14 предназначены для разделения фланцев 12 с токопроводящими выводами 13 от транспортного трубопровода 3.

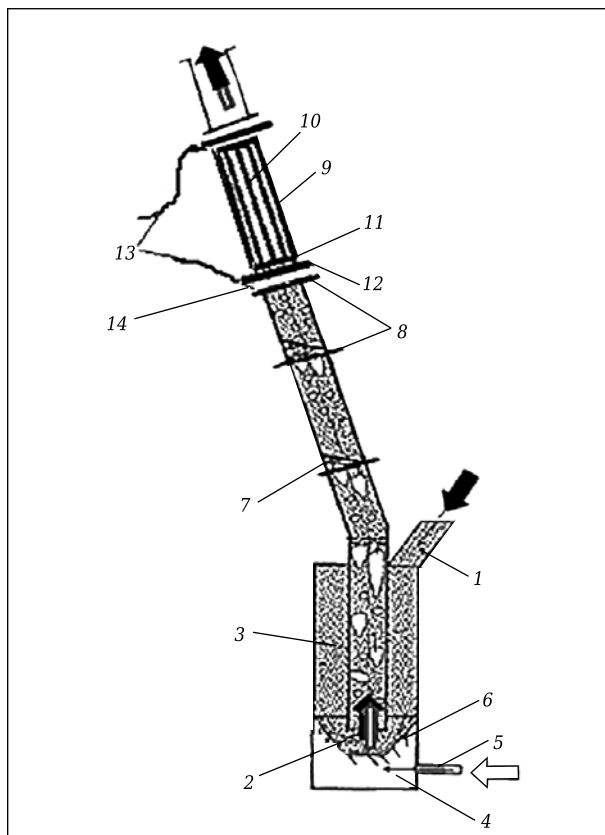


Рис. 3. Устройство для пневмоподъема сыпучих материалов, содержащих наночастицы

Устройство работает следующим образом. Сыпучий материал из загрузочного питателя 1 непрерывно поступает в смесительную камеру 4. Сжатый газ через газораспределительную пористую перегородку 6 подается под слой материала. После прохода через пористую газораспределительную перегородку 6 потоки газа аэрируют материал до псевдооживленного состояния. Под действием избыточного давления газа, подаваемого через патрубок 5, псевдооживленный материал подается в патрубок 2 вертикального трубопровода 3. Вся высота трубопровода 3

### Библиографический список

1. Гордеев, Ю. И. Влияние добавок легирующих керамических наночастиц на структурные параметры и свойства твердых сплавов / Ю. И. Гордеев, А. К. Абкарян, Г. М. Зеер [и др.] // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. — 2013. — № 3. — С. 174–181. <http://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-dobavok-legiruuschih-keramicheskikh-nanochastits-na-strukturnye-parametry-i-svoystva-tverdyh-splavov#ixzz3oKNTNR7c>.
2. Давыдов, С. Я. Утилизация пыли печей кальцинации глинозема, содержащей наночастицы / С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев, В. Н. Корюков // Новые огнеупоры. 2014. — № 8. — С. 10–13.

разделена поперечными перфорированными вставками 7 на отдельные участки. Вследствие наличия поперечных перфорированных вставок 7 частицы материала перемещаются по трубопроводу 3 в заторможенном состоянии со скоростью около 1 м/с. Частицы сыпучего материала, проходя через систему электродов 10 съемной вставки 9, приобретают электрический заряд и под действием электрического поля осаждаются на осадительных электродах, которые выполнены в виде экрана (на рис. 2 не показаны) с наноразмерными отверстиями менее 0,1 мкм. Для этой цели можно использовать пористую металлокерамику с открытыми порами.

После необходимого накопления на осадительных электродах частиц материала источник постоянного тока отключают. Для отделения наночастиц сыпучего материала съемные вставки 9 вынимают и промывают. Наночастицы химически активного сыпучего материала (например, известковой пыли) промывают индифферентной жидкостью (метиловым или этиловым спиртом). После отмывки от наночастиц съемные вставки 9 устанавливают в исходное положение.

В процессе ионизации газовых молекул электрическим разрядом происходит зарядка частиц, содержащихся в пылевоздушной смеси, затем под действием электрического поля эти частицы осаждаются на осадительных электродах и таким образом выделяются из общего потока. Для создания электрического поля, способного вызвать коронный разряд, коронирующие электроды присоединены к высоковольтному источнику постоянного тока.

Действуя описанным выше образом, разработанное устройство пневмотранспорта позволяет улавливать наноразмерные частицы сыпучего материала, содержащиеся в вертикальном потоке движущейся пылевоздушной смеси.

\*\*\*

Результаты настоящей работы получены в рамках реализации проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

3. Давыдов, С. Я. Энергосберегающее оборудование для транспортировки сыпучих материалов: исследование, разработка, производство / С. Я. Давыдов. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ—УПИ, 2007. — 317 с.
4. Давыдов, С. Я. Вращающиеся печи предприятий строительных материалов : учебное пособие / С. Я. Давыдов, В. А. Пьячев, И. Д. Кащеев [и др.]. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ—УПИ, 2005. — 352 с.
5. Давыдов, С. Я. Результаты обследования известковой пыли, содержащей наночастицы, на ОАО «Серовский

завод ферросплавов» / С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев, В. С. Куйко [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 3. — С. 20–21.

6. **Давыдов, С. Я.** Результаты обследования схемы пневмотранспорта известковой пыли, содержащей наночастицы, на ОАО «Серовский завод ферросплавов» / С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев, В. С. Куйко [и др.] // Новые огнеупоры. — 2015. — № 11. — С. 17–22.

7. **Давыдов, С. Я.** Повышение эффективности транспорта глиноземной пыли / С. Я. Давыдов, И. Д. Кащеев, А. А. Рукомойкин // Новые огнеупоры. — 2004. — № 5. — С. 9–12.

8. [https://studme.org/10691107/ekologiya/osazhdenie\\_aerozolnyh\\_chastits\\_elektricheskom\\_pole](https://studme.org/10691107/ekologiya/osazhdenie_aerozolnyh_chastits_elektricheskom_pole)

9. **ГОСТ Р 8.775–2011 ГСИ.** Дисперсный состав газовых сред. Определение размеров наночастиц по методу дифференциальной электрической подвижности аэрозольных частиц. — М.: Стандартинформ, 2012. — 14 с.

10. **Фенченко, В. Н.** Движение заряженных диэлектрических мелкодисперсных частиц в аппаратах электронно-ионной технологии / В. Н. Фенченко, О. В. Кравченко, В. И. Момот // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 3/10. — С. 50–53.

11. **Заявка на изобретение 2015144394 от 15.10.2015.** Устройство для подъема сыпучих материалов, содержащих наночастицы / Давыдов С. Я., Зобнин Б. Б., Апакашев Р. А., Вожегов А. В.

12. **Пат. 2194661 РФ.** Устройство для подъема сыпучих материалов с повышенной концентрацией в газовой смеси / Давыдов С. Я., Рукомойкин А. А., Пономарев А. В. — № 2000118011 ; заявл. 06.07.00 ; опубл. 20.12.02, Бюл. № 35.

13. **Пат. 2294886 РФ.** Устройство для подъема сыпучих материалов с повышенной концентрацией в газовой смеси / Давыдов С. Я. — № 2005107861 ; заявл. 21.03.05 ; опубл. 10.03.07, Бюл. № 7.


14. **Пат. 138223 РФ.** Устройство для непрерывного подъема сыпучих материалов / Давыдов С. Я., Косарев Н. П., Валиев Н. Г. — № 2013139816 ; заявл. 27.08.13 ; опубл. 10.03.14, Бюл. № 7.

15. **Пат. 57658 РФ.** Устройство для подъема сыпучих материалов в транспортном трубопроводе / Давыдов С. Я., Старцев В. А. — № 2015116776 ; заявл. 30.04.15. ■

Получено 24.11.15

© С. Я. Давыдов, Р. А. Апакашев, В. Н. Корюков, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



# ТЕРМООБРАБОТКА

Десятая международная специализированная выставка

## 13 - 15 сентября 2016

Россия, Москва, ЦВК «Экспоцентр», павильон 7, залы 1 и 2

Единственная в России  
выставка термического  
оборудования и технологий

**Разделы выставки:**


- ▶ Термическое, химико-термическое, индукционное оборудование
- ▶ Вакуумная техника и компоненты вакуумных систем
- ▶ Лабораторные печи, сушильные шкафы  
Лабораторное оборудование
- ▶ Установки нанесения покрытий
- ▶ Оборудование для электронно-лучевой сварки и сварки в среде аргона
- ▶ Лазерно-технологическое оборудование
- ▶ Комплексы глубокого охлаждения (криогенная обработка)
- ▶ Оборудование для исследования свойств материалов, неразрушающий контроль




**13 - 14 сентября** | Международная конференция «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМООБРАБОТКИ»

- ▶ Центробежное литье коррозионных, жаропрочных и специальных сталей и сплавов
- ▶ Отливки из жаропрочной стали, технологическая оснастка
- ▶ Огнеупоры, теплоизоляция и футеровка тепловых агрегатов
- ▶ Изделия из графита, углеродного войлока и углерод-углеродных композитов
- ▶ спец. раздел **Футеровка печей:** огнеупоры, теплоизоляция, клеи, футеровочные работы

**105 экспонентов из 15 стран мира**  
**3022 кв.м. экспозиции**  
**2690 посетителей-специалистов**

**Информационная поддержка:**



**Организатор:** ООО «Выставочная Компания «Мир-Экспо» | 115230, Россия, Москва, Хлебозаводский проезд, дом 7, строение 10, офис 507 | Тел./факс: 8 495 988-1620 | E-mail: info@htexporus.ru  
Сайт: www.htexporus.ru | Твиттер: @htexpo\_ru | YouTube: youtube.com/user/termoobrabotka