

Раздел третий

ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

3.3. Свойства золошлаков

3.3.11. Уточнение зависимости для определения критических скоростей пылегазовых потоков с учетом коэффициентов формы и полидисперсности частиц

И.В. Путилова, В.Я. Путилов, ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты собственных экспериментальных исследований формы и полидисперсности частиц проб циклонной сланцевой золы, неклассифицированной и классифицированной электрофильтровой золы, а также классифицированных микросфер, полученных при сжигании кузнецких углей на Беловской ГРЭС. Разработаны коэффициенты формы и полидисперсности частиц исследованных сыпучих материалов.

Уточнена зависимость для определения критических скоростей пылегазовых потоков при пневмотранспортировании мелкофракционных полидисперсных материалов с учетом формы частиц и их полидисперсности*.

1. ВВЕДЕНИЕ

В результате выполнения обзора российских и иностранных научно-технических источников информации по вопросу критических скоростей пылегазовых потоков в пневмотранспортных трубопроводах при различных режимах пневмотранспорта мелкофракционных полидисперсных сыпучих материалов выявлено, что исследования, проводившиеся в разных странах, содержат результаты применительно к конкретным условиям транспортирования материалов, при которых не учитывалось влияние формы и полидисперсности частиц на критические скорости пылегазовых потоков. Таким образом, были проведены собственные научные исследования формы и полидисперсности различных мелкофракционных полидисперсных материалов:

- циклонной сланцевой золы торговой марки "Zolest-oil";
- неклассифицированной и классифицированной летучей золы ТЭС Летабо (ЮАР);
- полых алюмосиликатных микросфер летучей золы Беловской ГРЭС.

Разработаны формулы для определения усредненных коэффициентов формы и полидисперсности сыпучих материалов. В конечном итоге уточнена зависимость для расчета критических скоростей пылегазовых потоков при перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах с учетом коэффициентов формы и полидисперсности частиц.

2. ПОДГОТОВКА К ИССЛЕДОВАНИЮ ФАКТОРА ФОРМЫ ЧАСТИЦ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗАТОРА IPS UA

2.1. Общие сведения

Для проведения исследований по разработке фактора формы частиц различных мелкофракционных полидис-

персных сыпучих материалов использована измерительная система IPS и метод "Elsieve". Автоматизированный мобильный лабораторный комплекс предназначен для исследования фракционного состава сухих мелкодисперсных сыпучих материалов с определением фактора формы частиц размерами от 0,5 мкм до 2 мм.

Двухмерный анализатор фракционного состава частиц. Согласно [1] измерительная система IPS (Infrared Particle Sizer) функционирует на основе датчика частиц, представленного на рис. 1, построенного из источника световой энергии – диода, работающего в коротковолновом ИК диапазоне (1), системы линз и диафрагм (А, В), устанавливающих измерительную поверхность (2), а также фотодиодного детектора (3) с электронным узлом (4) предварительной обработки сигнала.

Измерительное пространство формируется оптическим узлом таким образом, что его площадь значительна в сравнении с размерами измеряемых частиц. Такое формирование и равномерная чувствительность по всей поверхности обеспечивают полное устранение краевых погрешностей и одинаковое обнаружение всех частиц.

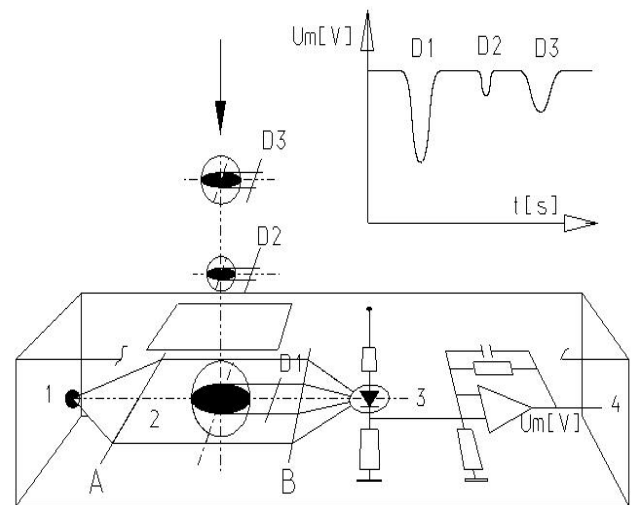


Рис. 2. Метод измерения частиц

Известно уравнение, описывающее зависимость между диаметром частицы и амплитудой электрического импульса. Учитывая характеристику преобразования светового потока на электрический сигнал в электронном узле, получается измерительная характеристика, выраженная в физических единицах (микронах), с нелинейностью в диапазоне малых диаметров анализируемых частиц.

* Статья подготовлена в соответствии с грантом РФФИ №12-08-31145 «Исследование критических скоростей пылегазовых потоков при перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах».

Для создания такой системы пригодны произвольные источники излучения с устойчивой и равномерной ха-

рактеристикой излучения. Оказалось, что лазерный диод для таких точных исследований не пригоден [1].

Существует строгая зависимость между минимальным размером зерна и шириной электрического импульса, зная при этом два взаимно перпендикулярных размера, рассчитанные в соответствии со сферической калибровкой, можно определить дополнительный коэф-

фициент формы частицы, равный отношению максимального размера к минимальному.

Ширина импульса однозначно определяет наименьший размер частицы, т.е. её толщину (рис. 2).

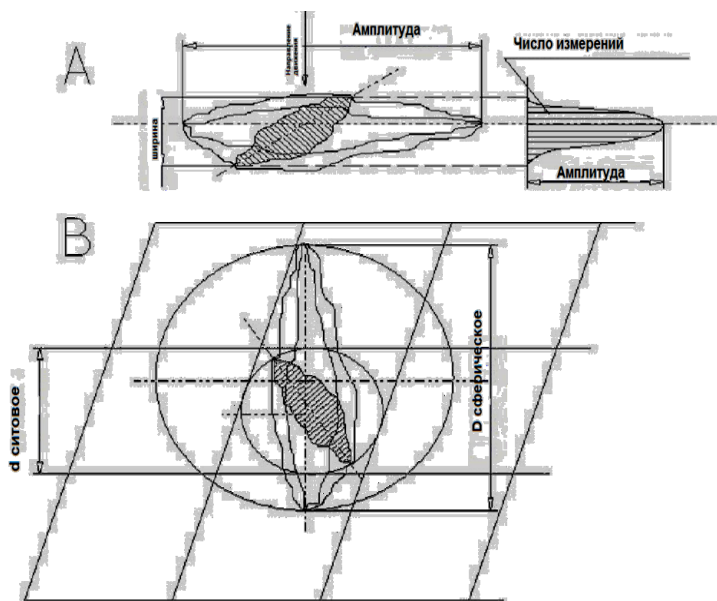


Рис. 2. Сравнение методов измерения. А. оптико-электронное измерение. В. ситовое измерение. Коэффициент формы $k_f = (\text{Амплитуда} / \text{ширина})$ импульса

В двухмерном анализаторе фракционного состава материала частицы в горизонтальном положении транспортируются воздухом к месту измерений, как показано на

рис.2 (А). Таким образом, $k_f = \frac{d_{\max}}{d_{\min}}$, где d_{\max} и d_{\min} –

максимальный и минимальный размеры частицы, соответственно.

На рис.3 приведен внешний вид анализатора IPS UP, который использовался в данном исследовании.

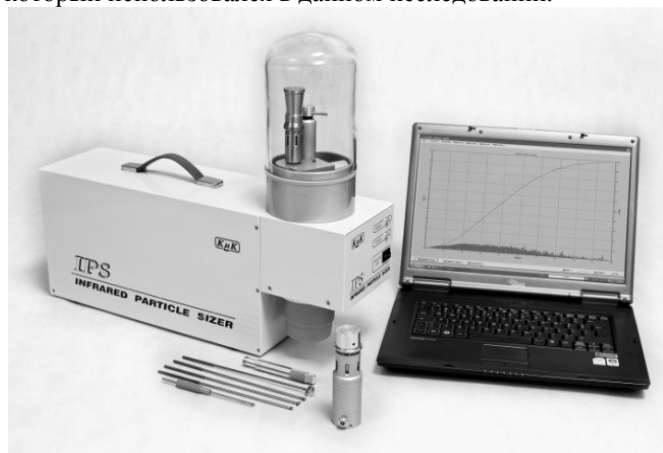


Рис. 3. Анализатор IPS UA

Для исследования фактора формы частиц были отобраны следующие представительные пробы:

1. Две пробы циклонной сланцевой золы торговой марки "Zolest-oil". Изготовлена на Нарвской электростанции (Эстония), изготовитель - "Eesti Energia Narva Elektriijaamad AS", 27.11.12, блок 6 А,Б, линии 1-4;
2. Проба летучей золы с силоса ТЭС Летабо (ЮАР), не подвергавшаяся переработке - PozzFill®.
3. Проба летучей золы с силоса ТЭС Летабо (ЮАР), подвергавшаяся пневмокласификации для отделения фракции менее 90 мкм - DuraPozz®. Зола соответствует

требованиям стандарта EN 450 по летучей золе класса S. Более крупная фракция или фракция, не соответствующая требованиям стандарта, транспортируется на золоотвал электростанции.

4. Проба летучей золы с силоса ТЭС Летабо (ЮАР) SuperPozz® получена в результате пневмокласификации DuraPozz®. SuperPozz® продается в очень небольшом количестве по сравнению с другими продуктами и изготавливается по требованиям Заказчиков.
5. Проба полых алюмосиликатных микросфер летучей золы Беловской ГРЭС.

2.2. Характеристики проб

2.2.1. Свойства циклонной сланцевой золы «Zolest-bet»
Выдержки из Протокола исследования физических свойств, выполненного Санкт-Петербургским государственным технологическим институтом (техническим университетом)

Таблица 1. **Физические характеристики циклонной сланцевой золы «Zolest-bet».**

Наименование параметра	Величина
Остатки на ситах, масс %: 008	35,8
005	21,8
Плотность зерен, г/см ³	2,55
Удельная поверхность по Блейну, см ² /г	850÷1100 по двум эталонам

Протокол исследования количественного химического состава № 1873-12, выполненного Региональным аналитическим центром ЗАО «МЕХАНОБР ИНЖИНИРИНГ АНАЛИТ» от 05.12.2012.

Объект: порошок серого цвета (масса пробы ~300г.)

Название пробы: сланцевая зола циклонная «ZOLEST-oil» по ТУ 5743-003-87367999-2012 партия № 527 от 31.10.12

Дата поступления: 05.12.2012г.

Анализ выполнен по ГОСТ 5382-91 –определение K_2O , Na_2O , пп, SO_3 . Для остальных показателей использовано разложение по ГОСТ 5382-91, определение атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой.

Результаты химического анализа представлены в табл.2.

Таблица 2. Химический состав циклонной сланцевой золы «Zolest-bet»

№ п/п	Показатели	Содержание, % масс.
	Регистрационный номер	
1	SiO_2	24,1
2	CaO	50,0
3	$CaO_{своб.}$	20,0
4	MgO	6,78
5	Fe_2O_3	3,70
6	Al_2O_3	5,49
7	SO_3	3,37
8	K_2O	1,60
9	Na_2O	0,066
10	П.п.п.	4,77
11	хлориды	0,56

Выдержки из Протокола исследования фазово-минералогического состава, выполненного Санкт-Петербургским государственным технологическим институтом (техническим университетом)

Проба довольно сложного минералогического состава и представлена следующими компонентами:

- 1.а. Сферические стекловатые частицы – от бесцветных до коричневых и черных; прозрачные и с включениями других фаз, с переменными показателями светопреломления – от 1.500 до 1.720; размер – от 10÷15 до 70, редко – до 100÷200 мкм.
- б. Угловатые бесцветные пластинки и зерна неправильной формы с N от 1.510 до 1.530 (вероятно, щелочное стекло).
- в. Неправильной формы обломки с N до 1.630÷1.650, часто с дендритными вростками кристаллических фаз – предположительно стекло геленитового состава с вростками минералов мелилитовой группы (размер от 40 до 80 мкм).
2. CaO и $Ca(OH)_2$
CaO в свободном виде практически не встречается.
а. Обычно это бывшие кристаллы $CaCO_3$ с точечными (1÷3 мкм) вростками $CaO_{св}$, заблокированные стеклом,
б. Овальные зерна стекла также с точечными вростками $CaO_{св}$.
 $Ca(OH)_2$, частично карбонизированный, образуется вокруг крупных агрегатов, в состав которых входят остатки не до конца разложившихся исходных минералов и образовавшиеся при обжиге.
3. $CaCO_3$ – мелкие вторичные зерна и единичные крупные кристаллы $CaCO_3$.
4. Остатки минерального сырья – кварц, слюда, полевые шпаты, пироксены. Полевые шпаты и пироксены по-

крыты мелкозернистыми продуктами обжига – CaO, оксиды железа, стекло.

5. Крупные (до 70 мкм) бесцветные и буроватые агрегаты с N до 1.720 и выше, крайне неоднородные по составу. Образовавшиеся на них продукты обжига от 3 до 7 мкм, что не позволяет точно идентифицировать их состав. Предположительно, они содержат $CaO_{св}$, силикаты кальция, оксиды железа.
6. Овальные агрегаты бурого цвета, состоящие из $\beta-C_2S$, оксидов железа и алюмоферритов кальция (предположительно) ~ 50÷70 мкм.
7. MgO - редкие овальные зерна коричневого цвета с N~1.735.
8. Единичные пластинки $\beta-CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$ и кристаллы $CaSO_4$.
9. Углистые образования.

Примерный минералогический состав представлен в табл.3. Таблица 3. Минералогический состав циклонной сланцевой золы «Zolest-bet»

№ п/п	Показатели	Величина
1	Сферические стекловатые частицы	~15÷18%
2	Бесцветное (предположительно) щелочное стекло	~3÷4%
3	Стекло и минералы мелилитовой группы	~18÷20%
4	CaO	~18÷20%
5	$Ca(OH)_2$	~4÷5%
6	$CaCO_3$	~5÷6%
7	Остатки минералов сырья	~4÷5%
8	Крупные бесцветные и бурые обломки с N до 1.720, иногда чуть выше	~5÷18%
9	Агрегаты, содержащие $\beta-C_2S$, Fe_2O_3 и алюмоферриты кальция	~5÷6%
10	MgO	~1÷2%
11	Гипс и ангидрит	~1%
12	Углистые частицы	~2÷3%

2.2.2. Свойства летучей золы PozzFill®

Согласно [2] частицы PozzFill® имеют сферическую форму с размерами от 120 до менее 1 мкм. Цвет продукта – серый. Насыпная плотность материала – 1100 кг/м³. На рис.4 приведена микрография частиц PozzFill®.

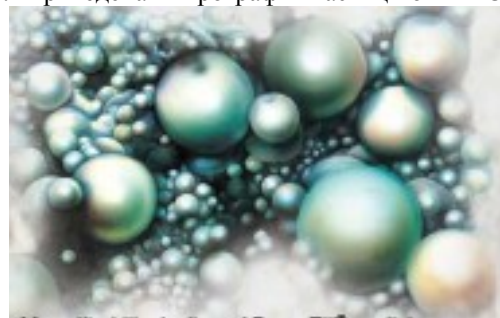


Рис.4. Микрография частиц PozzFill®.

Типичный химический состав поставляемой компанией Ash Resources золы представлен в табл.4, кривая распределения по фракциям приведена на рис.5 [2].

Таблица 4. Типичный химический состав золы PozzFill®, поставляемой компанией Ash Resources

№ п/п	Показатели	Содержание, % масс.
1. 1	SiO ₂	51,0 ÷ 65,0
2. 2	Al ₂ O ₃	25,0 ÷ 35,0
3. 3	Fe ₂ O ₃	3,0 ÷ 5,0
4. 4	Mn ₂ O ₃	0,1 ÷ 0,15
5.	MgO	0,5 ÷ 2,0
6.	CaO	1,0 ÷ 6,0
7.	P ₂ O ₅	0,3 ÷ 0,7
8.	K ₂ O	0,5 ÷ 1,0
9.	N ₂ O	0,1 ÷ 0,6
10.	TiO ₂	1,6 ÷ 2,0
11.	SO ₃	0,1 ÷ 0,3
12.	П.п.п.	0,8 ÷ 2,5

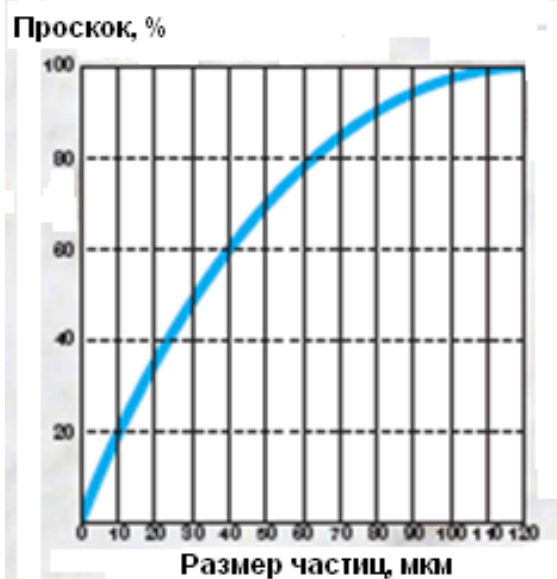


Рис. 5. Кривая распределения частиц золы PozzFill® по фракциям.

2.2.3. Свойства летучей золы DuraPozz®

Частицы DuraPozz® имеют преимущественно сферическую форму [3]. Средний диаметр частиц DuraPozz® - 25 мкм. Около 90 % частиц DuraPozz® имеют размер менее 45 мкм [4]. В табл.5 приведен химический состав

материала [5].

На рис.6 и 7 представлена микрография частиц DuraPozz® и показана кривая распределения частиц по фракциям [5].

Таблица 5. Химические характеристики золы DuraPozz®.

№ п/п	Показатели	Величина
1.	SiO ₂	47,0...55,0
2.	Al ₂ O ₃	25,0...35,0
3.	Fe ₂ O ₃	3,0...4,0
4.	Mn ₂ O ₃	0,1...0,2
5.	CaO	4,0...10,0
6.	MgO	1,0...2,5
7.	P ₂ O ₅	0,5...1,0
8.	K ₂ O	0,5...1,0
9.	Na ₂ O	0,2...0,8
10.	TiO ₂	1,0...2,0
11.	SO ₂	0,1...0,5
12.	Потери при прокаливании	0,5...2,0

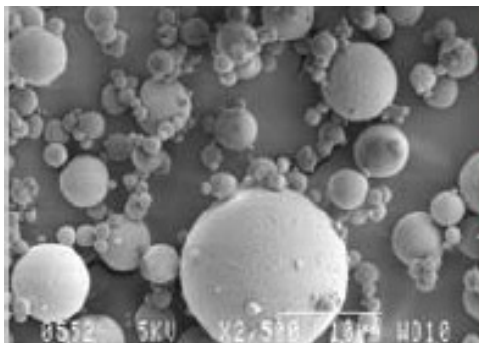


Рис.6. Микрография частиц DuraPozz®.

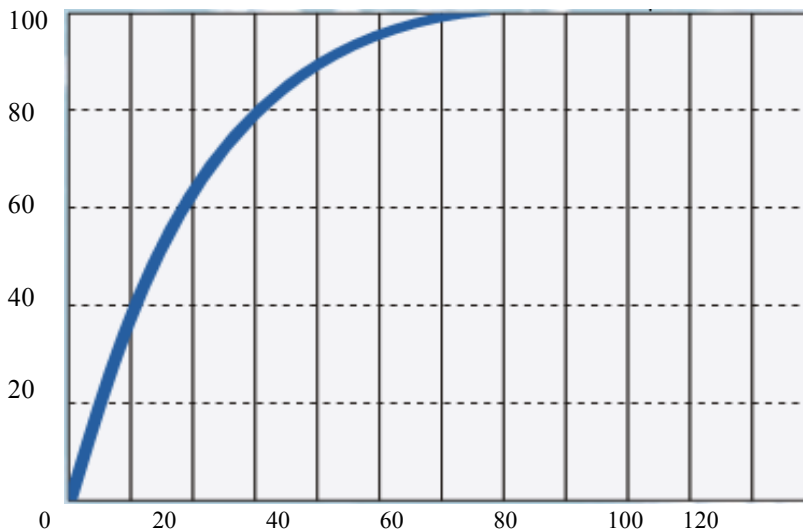


Рис.7. Кривая распределения частиц DuraPozz® по фракциям.

2.2.4. Свойства летучей золы SuperPozz®

SuperPozz® представляет собой мелкую фракцию со средним диаметром частиц от 3,9 до 5,0 мкм. На рис.8 представлена микрография частиц SuperPozz®.

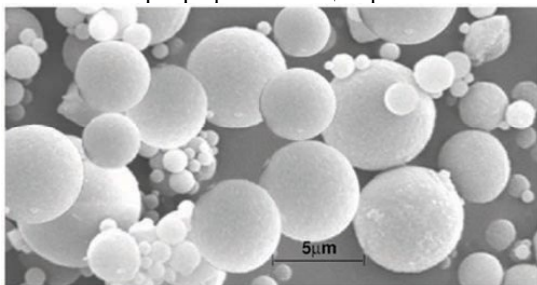


Рис.8. Микрография частиц SuperPozz®

При этом более 90 % частиц имеют размер менее 11 мкм, т.е. остаток на сите R11=10 % [2].

На рис.9 показана кривая распределения частиц SuperPozz® по фракциям в сравнении с классифицированной золой, отвечающей требованиям стандарта BS 3892, и кварцевой пылью. В табл.6 и 7 приведены физические и химические характеристики материала SuperPozz®.

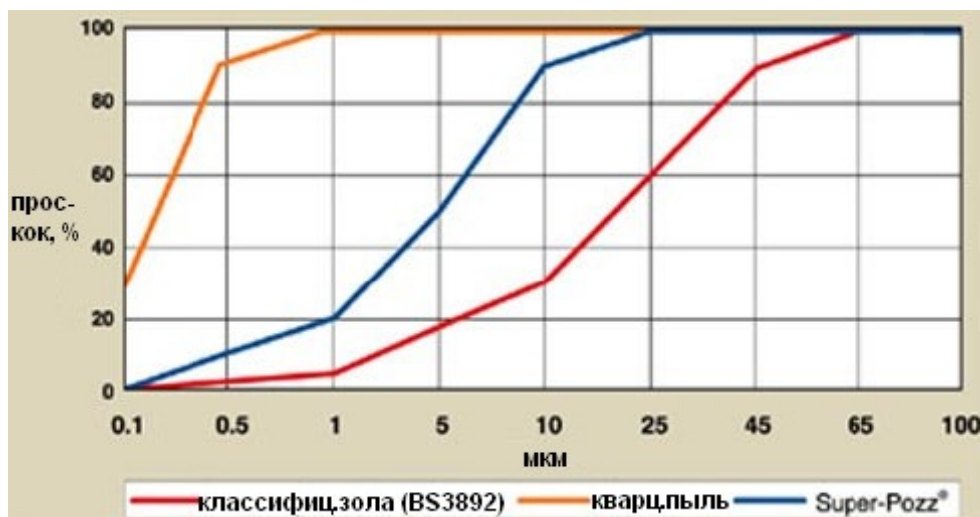


Рис.9. Фракционный состав SuperPozz® и некоторых других материалов

Таблица 6. Физические характеристики золы SuperPozz®.

№ п/п	Показатели	Величина
1.	Относительная плотность	2,2
2.	Теоретическая удельная поверхность, см ² /г	13000
3.	Показатель pH в воде	11÷12
4.	Влажность, %	<0,2
5.	Цвет	светло-серый
6.	Потери при прокаливании (п.п.п.), %	0,4
7.	Содержание углерода, %	<0,2

Таблица 7. Химический состав материала SuperPozz®

№ п/п	Показатели	Содержание, % масс.
1.	SiO ₂	53,5
2.	Al ₂ O ₃	34,3
3.	Fe ₂ O ₃	3,6
4.	CaO	4,4

2.2.5. Свойства полых алюмосиликатных микроффер летучей золы Беловской ГРЭС

Выдержки из Протокола исследования химического состава полых алюмосиликатных микроффер, выполненного ООО «ИЦ СММК «Кузбасс».

Дата исследования: 17 марта 2011 г.

№ п/п	Показатели	Содержание, % масс.	Показатели по ТУ-5760-001-64538978-2011
1.	SiO ₂	60,62	55÷69
2.	Al ₂ O ₃	23,68	15÷40
3.	Fe ₂ O ₃	4,82	1,5÷8,5
4.	CaO	1,72	–
5.	MgO	0,61	–
6.	MnO	0,91	–
7.	TiO ₂	1,08	0,5÷2,5
8.	P ₂ O ₅	0,25	–
9.	П.п.п.	3,96	–

Выдержки из Протокола исследования химического состава летучей золы Беловской ГРЭС, выполненного АСИЦ ВИМС

Дата исследования: 16 мая 2011 г.

Объект анализа	Легкая фракция золы уноса Беловской ГРЭС. ТУ 5712-001-52562003-2005 код ТН ВЭД 2621 90 000 0. Образец-свидетель - сыпучий материал светло-серого цвета. Вес брутто 829 г. в полиэтиленовом пакете, вложенном во внешний бумажный пакет внешний бумажный пакет опечатан печатью ООО "ЛИТЭСТ" и маркирован биркой
Маркировка	маркирована бирка на внешнем бумажном пакете <i>Легкая, фракция золы уноса Беловской ГРЭС</i>
Пробоотбор	осуществлялся комиссией в составе: начальника участка, директора филиала ООО "ЛИТЭСТ". Акт отбора проб б/н от 05.05.2011 г.
Методы анализа:	рентгеноспектральный флуоресцентный (РСА); атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС)
Аппаратура	Рентгеновский спектрометр ("Philips" Голландия), атомно-эмиссионный с индуктивно-связанной плазмой спектрометр 4300DV ("Perkin-Elmer", США)

Результаты испытаний

№	Элемент	Содержание, масс. доля %		Метод анализа
		по ТУ 5712-001-52562003-2005	в пробе	
1.	SiO ₂	57,0 – 65,0	63,4	РСА
2.	Al ₂ O ₃	15,0 - 40,0	30,8	РСА
3.	Fe ₂ O ₃	2,0 - 13,0	2,71	ИСП - АЭС
4.	CaO	0,3 – 6,0	0,91	ИСП - АЭС
5.	MgO	0,1 - 3,5	0,17	ИСП - АЭС
6.	Na ₂ O		0,26	ИСП - АЭС
7.	K ₂ O		0,41	ИСП - АЭС
8.	TiO ₂		1,13	ИСП - АЭС
9.	MnO		0,030	ИСП - АЭС

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КРУПНОСТИ, УДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА И ФОРМЫ ЧАСТИЦ

Анализатор, использовавшийся в исследованиях, позволяет проводить измерения двух размеров частиц - максимального и минимального, и определять коэффициент формы частиц по группам фракций, а также усредненную величину коэффициента формы всей пробы. Изначально разработчиками анализатора был заложен принцип определения коэффициента формы частиц через отношение максимального размера частицы к минимальному, однако, авторы статьи полагают, что для определения коэффициента формы частиц корректнее относить минимальный размер частицы к ее максимальному размеру, в связи с чем соответствующее программное обеспечение было доработано с учетом наших пожеланий.

В работе были исследованы следующие материалы:

- циклонная сланцевая зола торговой марки «Zolest-oil» (пробы №№1-2);
- неклассифицированная зола PozzFill® (проба №3);
- классифицированная зола DuraPozz® (проба №4);
- дважды классифицированная зола SuperPozz® (проба №5);
- проба полых алюмосиликатных микросфер летучей золы Беловской ГРЭС (проба №6).

Основные результаты исследований диаметров и формы частиц пробы №1 сланцевой золы приведены в табл. 8. При этом агрегатная плотность материала составила 2,55 кг/м³.

Зависимость процентного содержания частиц с одинаковым объемом B_v от размера частиц D_i представлена на рис. 10. На рис.11 приведены данные о сферичности частиц в зависимости от их размеров.

Таблица 8. Результаты исследований диаметров и формы частиц сланцевой золы

Число частиц	222689
Время измерений, с	267,0
Среднеарифметический диаметр частиц d_{cp} , мкм	15,0
Средний поверхностный диаметр $d_{s, cp}$, мкм	20,7
Средний объемный диаметр, $d_{v, cp}$, мкм	27,8
Средний поверхностно-объемный диаметр, $d_{vs, cp}$, мкм	49,8
Геометрический диаметр, d_{geo} , мкм	10,8
Медианный диаметр d_{med} , мкм	64,4
Модальный диаметр d_{mod} , мкм	43,3
Минимальный размер частиц, мкм	5,6
Максимальный размер частиц, мкм	242,2
Удельная поверхность частиц, см ² /г	973
Удельная поверхность частиц по объему, см ² /см ³	2482
Средняя ширина частиц	24,6
Коэффициент формы W_k	1,753

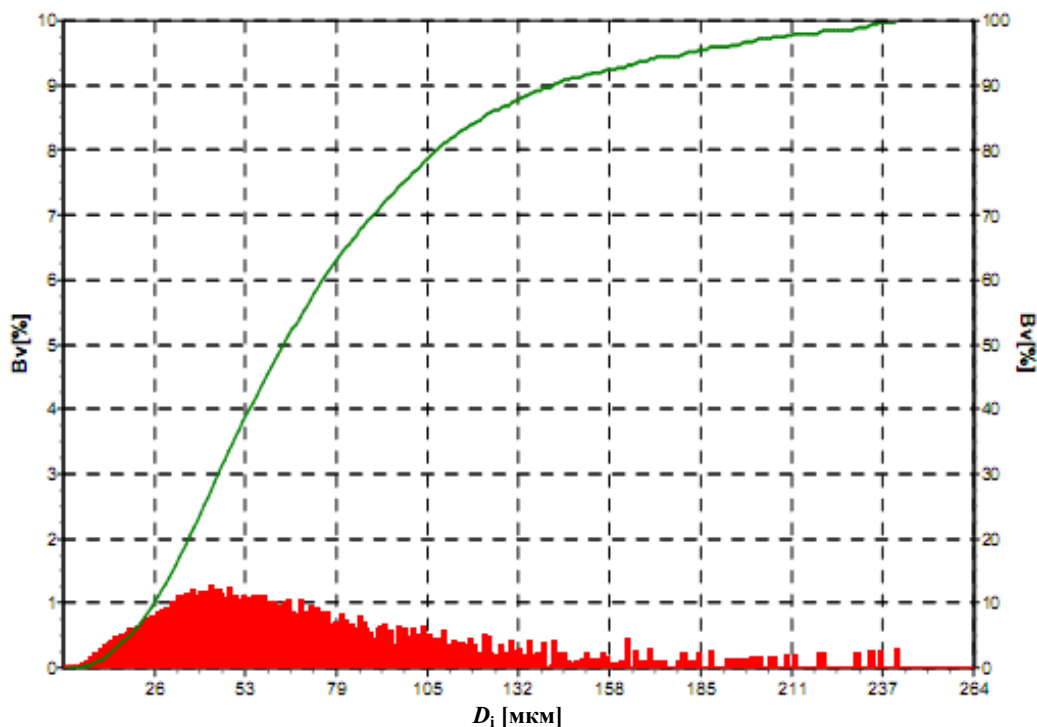


Рис.10. Зависимость содержания частиц с одинаковым объемом от размера частиц

Фракционный состав золы представлен в табл. 9. Исследования фракционного состава материала производи-

лись с использованием ситового анализа при сферической калибровке сит.

Кривая остатков на сите при исследовании пробы мы частиц от их диаметра приведена на рис. 13. сланцевой золы приведена на рис.12. Зависимость фор-

Таблица 9. Фракционный состав пробы №1 сланцевой золы.

Номер сита	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Размер ячейки сита, мкм	Дно	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	120,00	160,00	200,00
$B_v, \%$	100,00	99,14	94,70	87,06	76,31	64,77	54,27	44,87	36,72	15,63	7,50	3,21
W_k	2,755	1,488	1,297	1,230	1,172	1,131	1,098	1,092	1,096	1,151	1,250	1,321
$1/W_k$	0,363	0,672	0,771	0,813	0,853	0,884	0,911	0,916	0,912	0,869	0,800	0,757

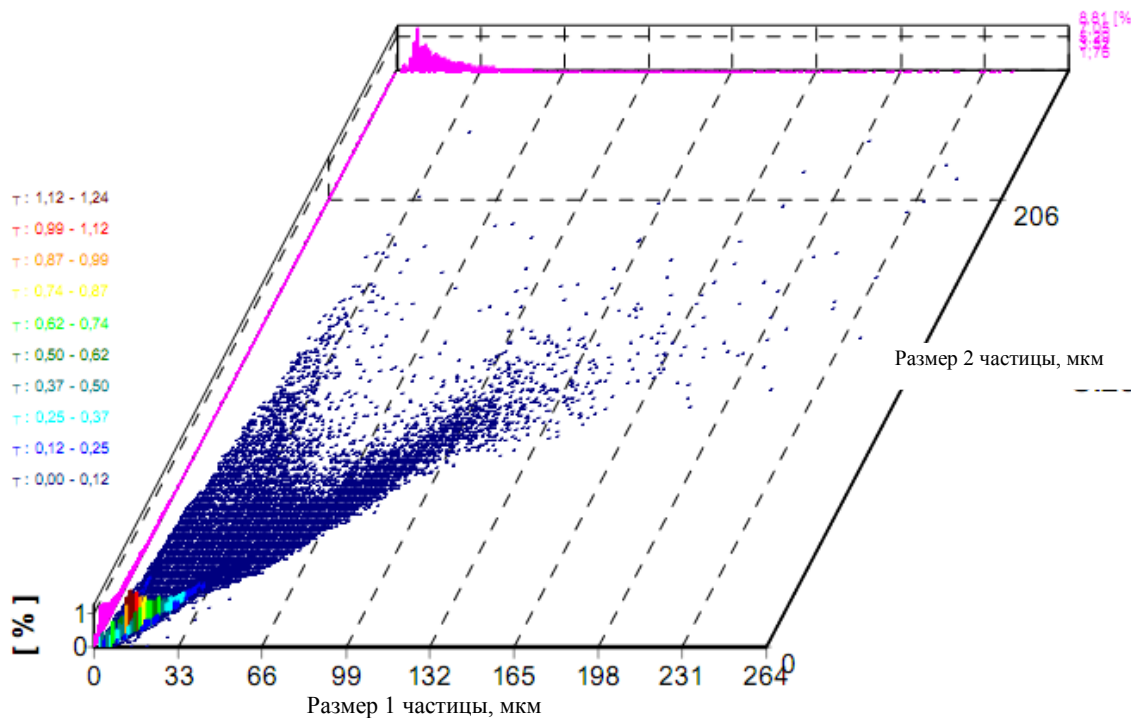


Рис. 11. Показатель сферичности частиц в зависимости от их размеров

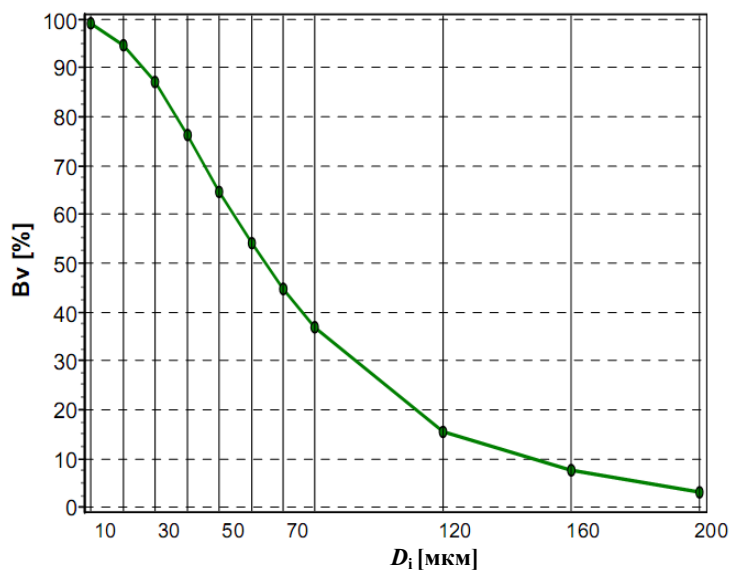


Рис. 12. Кривая остатков на сите при расфевке пробы №1 сланцевой золы

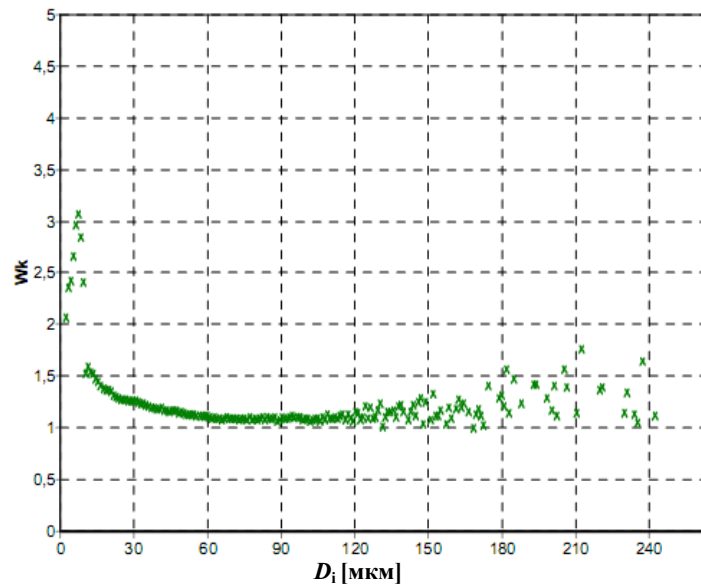


Рис. 13. Зависимость коэффициента формы частиц от их диаметра

Анализ результатов исследований крупности, удельной поверхности, фракционного состава и формы частиц пробы №1. Крупность частиц циклонной золы меняется от 6 до 241 мкм, однако, основная масса частиц имеет размеры от 10 до 130 мкм. Коэффициент микропористости материала составил 2,06. При этом, показатель удельной поверхности частиц равен 973 см²/г, что соответствует результатам исследований удельной поверхности, выполненным в Санкт-Петербургском государственном технологическом институте (табл.1). Средний коэффициент формы частиц золы равен 1,753. Анализируя результаты исследований сферичности частиц следует, что сферическую форму имеют частицы, находящиеся на диагонали (рис.11). Причем, разными цветами обозначены группы частиц с разными параметрами (минимальный и максимальный размер, удельная поверхность частиц и т.д.). Например, 1,12...1,24 % частиц имеют диаметры 10,5...12,5 мкм, 0,99...1,12 % частиц с диаметрами 12,5...13,5 мкм, 0,87...0,99 % частиц с диаметрами 10,5 и 14,6 мкм и т.д. Таким образом, чем мельче частицы, тем их форма более близка к сфере, а чем они крупнее - тем их форма становится все более неправильной. Частицы размерами от 60 до 120 мкм имеют форму близкую к сферической, коэффициент формы этих частиц близок к 1,1. Около 21 % частиц имеют крупность от 80 до 120 мкм.

Аналогичным образом были проведены исследования и проанализированы их результаты для проб №2-6.

4. РАЗРАБОТКА КОЭФФИЦИЕНТА ФОРМЫ ЧАСТИЦ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Авторы статьи полагают, что коэффициент формы одной частицы должен определяться, как отношение ми-

нимального размера частицы d_{min} к максимальному d_{max} , а не наоборот, в случае ее двухмерного измерения, т.е.:

$$k_{f1} = \frac{d_{min}}{d_{max}} \quad (1)$$

В случае трехмерного измерения частицы коэффициент формы – отношение минимального размера частицы d_{min} к полусумме оставшихся двух размеров d_1 и d_2 , т.е.

$$k_{f1} = \frac{d_{min}}{d_1 + d_2} \quad (2)$$

Выбрана формула (1), т.к. при проведении экспериментов использовался двухмерных анализатор фракционного состава частиц.

Таким образом, $0 < k_f \leq 1$. Для сферических частиц коэффициент формы равен 1, а для несферических частиц он менее 1.

Для определения коэффициента формы представительной пробы частиц необходимо иметь фракционный состав исследуемой пробы с коэффициентами формы частиц по группам фракций $k_{f1} \dots k_{fn}$. Тогда средний коэффициент формы k_f будет равен:

$$k_f = \frac{k_{f1} \cdot m_1 + k_{f2} \cdot m_2 + \dots + k_{fi} \cdot m_i}{100\%}, \quad (3)$$

где $m_1 \dots m_i$ – содержание 1...i фракций частиц, % по массе.

На основании данных исследований фракционного состава проб №№1-6 выполнен расчет усредненных коэффициентов формы материалов с использованием зависимости (3).

В табл. 10 приведены величины коэффициентов формы для проб №№1÷6 на основании исследований фирмы “Kamika” и исследований МЭИ.

Таблица 10. Величины коэффициентов формы для проб №№1÷6.

№ пробы	Материал	$W_{k \text{ ср kamika}}^{1)}$, расчет Kamika	$W_{k \text{ ср мэи}}^{2)}$, расчет МЭИ	$k_f^{3)}$, расчет МЭИ
1	Циклонная зола эстонских сланцев «Zolest-oil»	1,753	1,188	0,852
2	Циклонная зола эстонских сланцев «Zolest-oil»	1,377	1,117	0,904
3	Неклассифицированная зола PozzFill®	1,915	1,283	0,807
4	Классифицированная зола DuraPozz®	2,141	1,470	0,732
5	Дважды классифицированная зола SuperPozz®	2,283	1,929	0,564
6	Полые алюмосиликатные микросферы золы Беловской ГРЭС	1,218	1,134	0,882

Примечания:

¹⁾ W_k ср kamika получено в результате исследования проб №№1-6 с помощью анализатора фирмы “Kamika”. При этом считалось, что коэффициент формы частиц $W_k = d_{max}/d_{min}$.

²⁾ W_k ср мэи определено на основании зависимости (3), подставляя $W_{k1} \dots W_{kn}$ вместо $k_{f1} \dots k_{fn}$. Содержание фракций частиц и $W_{k1} \dots W_{kn}$ взято из результатов исследований фракционного состава проб №№1-6 с помощью анализатора “Kamika”.

³⁾ k_f ср определено по зависимости (3). При этом считалось, что коэффициент формы частиц $k_f = d_{min}/d_{max}$.

5. РАЗРАБОТКА КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Исходя из того, что полидисперсность материала – это неоднородность частиц по крупности или разнофракционность, то коэффициент полидисперсности k_d зависит от средневзвешенной крупности материала, которая определяется по формуле:

$$d_{ср.вз} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot m_i}{100} \quad (4)$$

Полидисперсность материала также зависит от медианного диаметра частиц в распределении. Таким образом, при определении коэффициента полидисперсности материала необходимо учитывать средневзвешенную крупность частиц $d_{ср.вз}$, а также медианный диаметр частиц d_{med} :

$$k_d = \frac{d_{ср.вз}}{d_{med}} \quad (5)$$

Авторы полагают, что $k_d > 1$. Для монодисперсных сред $k_d = 1$, для полидисперсных сред $k_d > 1$.

В табл.11 приведены величины коэффициентов полидисперсности для проб №№1-6, рассчитанные по разработанной зависимости (5). Средневзвешенная крупность определена по формуле (4) на основании измерений фракционного состава материалов. Величины медианных диаметров частиц получены при выполнении экспериментов с помощью анализатора Kamika.

Таблица 11. Коэффициент полидисперсности для проб №№1-6.

№ пробы	Материал	$d_{ср.вз}$, МКМ	d_{med} , МКМ	k_d
1	Циклонная зола эстонских сланцев «Zolest-oil»	76,83	64,4	1,19
2	Циклонная зола эстонских сланцев «Zolest-oil»	75,33	64,3	1,17
3	Неклассифицированная зола PozzFill®	73,44	60,0	1,22
4	Классифицированная зола DuraPozz®	42,99	31,4	1,37
5	Дважды классифицированная зола SuperPozz®	15,59	12,6	1,24
6	Полие алюмосиликатные микросферы золы Беловской ГРЭС	48,89	48,3	1,01

Таким образом, наиболее однородными материалами являются те, средневзвешенная крупность которых близка к медианному диаметру. Наиболее однородным из всех исследуемых материалов являются микросферы Беловской ГРЭС, что и подтвердили результаты расчета коэффициента полидисперсности.

6. УТОЧНЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА КРИТИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ ПЫЛЕГАЗОВЫХ

ПОТОКОВ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПНЕВМОТРАНСПОРТНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ С УЧЕТОМ ФАКТОРОВ ФОРМЫ И ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ ЧАСТИЦ

Критическая скорость пылегазовых потоков при перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах без учета факторов формы и полидисперсности материала определяется по выражению (6) из [6].

$$U_{кр} = 0,481 \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} \right)^{0,581} \left(\frac{D_{200}}{D} \right)^{0,943} \left(\frac{\rho_m d_0}{6} \right)^{0,159} m^{-0,258} \quad (6)$$

Изначально это выражение применялось для расчета критических скоростей при выполнении условий:

$$m \geq 2; D \geq 0,08 \text{ м}; d_{ср.вз} \geq 20 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

где m – массовая расходная концентрация потока смеси материала и воздуха, кг материала/кг воздуха; D – внутренний диаметр трубопровода, м; $d_{ср.вз}$ – средневзвешенный эквивалентный диаметр частиц материала (средневзвешенная крупность), м.

При проведении исследований проб №№1-6 выяснилось, что упомянутая зависимость может применяться для расчета материалов крупностью менее 20 мкм, в том числе и для определения критической скорости при транспортировании дважды классифицированной золы Superprozz®, средневзвешенная крупность которой составила 16 мкм.

При исследовании влияния формы частиц на критические скорости пылегазовых потоков была разработана зависимость с учетом коэффициента формы частиц:

$$U_{кр} = 0,381 \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} \right)^{0,581} \left(\frac{D_{200}}{D} \right)^{0,943} \left(\frac{\rho_m d_0}{6} \right)^{0,159} m^{-0,258} \cdot k_f \quad (7)$$

Коэффициент формы k_f определяется по зависимости (3).

В результате проведения экспериментальных и аналитических исследований авторами статьи разработана зависимость для расчета критических скоростей пылегазовых потоков для различных условий пневмотранспортирования с учетом фактора формы и полидисперсности частиц:

$$U_{кр} = 0,317 \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} \right)^{0,581} \left(\frac{D_{200}}{D} \right)^{0,943} \left(\frac{\rho_m d_0}{6} \right)^{0,159} m^{-0,258} \cdot \frac{k_f}{k_d} \quad (8)$$

Коэффициент полидисперсности k_d определяется по формуле (5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены собственные экспериментальные исследования формы и полидисперсности проб сланцевой золы, неклассифицированной и классифицированной золы, а также и зольных микросфер.

Разработаны зависимости для определения коэффициентов формы и полидисперсности частиц мелкофракционных полидисперсных материалов.

Уточнена зависимость для расчета критических скоростей пылегазовых потоков при перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах с учетом факторов формы и полидисперсности частиц.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Д. Каминска, С. Камински.** Применение приборных комплексов Kamika для исследования фракционного состава угольной пыли и золы, и измерения запыленности уходящих газов ТЭС / Материалы IV Международного научно-практического семинара «Золошлаки ТЭС: удаление, транспорт, переработка, складирование». Москва, 19-20 апреля 2012 г. — М.: Издательский дом МЭИ. — с. 78-84.
2. <http://www.ash.co.za/upload/File/POZZ-FILL%20DATA%20SHEET.pdf>
3. <http://www.ash.co.za/upload/file/AshResourcesCorporateBrochure.pdf>

[e.pdf](#)

4. <http://www.ash.co.za/Tabs.aspx?pg=36#fragment-44>

5. <http://www.ash.co.za/upload/file/DuraPozz.pdf>

6. **В.Я. Путилов.** Аэродинамика систем напорного пневмотранспорта золы тепловых электростанций. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. - М.: МЭИ, 1992, 20 с.

И.В. Путилова, В.Я. Путилов. Уточнение зависимости для определения критических скоростей пылегазовых потоков с учетом коэффициентов формы и полидисперсности частиц // Энергосбережение и водоподготовка, №5, 2014.