

## Раздел третий

### ОБРАЩЕНИЕ С ЗОЛОШЛАКАМИ

#### 3.3. Свойства золошлаков

##### 3.3.10. Исследование влияния формы и полидисперсности частиц на критические скорости пылегазовых потоков при транспортировании мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах

*И.В. Путилова, В.Я. Путилов, А.Р. Хасянишина, ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия*

#### АННОТАЦИЯ

В статье приведены краткие результаты анализа материалов исследований различных режимов пневмотранспорта мелкофракционных полидисперсных сыпучих материалов, приведенные в российских и зарубежных источниках научнотехнической информации. Рассматривались следующие режимы: пробочный, летучая транспортировка с существенно разными скоростями потоков, транспортирование мелкофракционных материалов с частицами различной крупности и геометрической формы – от шарообразной до пластинчатой, остроугольной и даже раковинообразной. Представлены результаты анализа пневмотранспортных технологий, используемых в энергетике России и стран мирового сообщества. Приведены краткие результаты анализа исследования источников научнотехнической информации по вопросу определения формы и полидисперсности частиц мелкофракционных полидисперсных материалов.<sup>1</sup>

#### 1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ПНЕВОТРАНСПОРТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Благодаря использованию пневмотранспортных технологий можно перемещать большое количество разнообразных сухих мелкофракционных полидисперсных материалов, применяющихся в различных отраслях промышленности, как внутри цеховых помещений, так и за их пределами. Транспортируемые материалы могут иметь различные физико-механические свойства, химико-минералогический и фракционный составы, а также разнообразные формы частиц. Плотность транспортируемых частиц может меняться от 16 до 3200 кг/м<sup>3</sup> [1]. При перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах одним из основных значимых факторов является критическая скорость пылегазового потока. Через критическую скорость воздуха в пылегазовых потоках определяют необходимую для надежной работы пневмотранспортных установок рабочую скорость воздуха, которая существенно влияет на величину удельных энергозатрат на перемещение сыпучих материалов и абразивный износ пневмотранспортного оборудования. Существуют различные режимы пневмотранспортирования мелкофракционных полидисперсных материалов, таких как зола, угольная пыль, песок и др. – режим летучей транспортировки, пробочный режим и транспортирование материалов в плотном потоке. При различных режимах транспортирования наблюдаются критические скорости потоков, отличающиеся в десятки раз. Перемещаемые частицы имеют существенно различную геометрическую форму – от шарообразной до пластинчатой, остроугольной и даже

раковинообразной, что также влияет на характер их транспортирования. Необходимо учитывать также и то, что частицы в потоке взаимодействуют друг с другом.

Трубопроводный пневмотранспорт сыпучих материалов появился еще в 1866 г. [2]. Он широко и успешно применяется на предприятиях различных отраслей экономики стран мирового сообщества по нескольким причинам: во-первых, пневмотранспорт является достаточно надежным способом перемещения мелкофракционных полидисперсных материалов по сравнению с другими видами транспортирования; во-вторых, он является экономически более эффективным по сравнению с механическим и гидравлическим транспортом; в-третьих, пневмотранспорт – экологически более приемлемый способ транспортирования материалов с точки зрения воздействия на окружающую среду, т.к. пневмотранспортный трубопровод является закрытым элементом, и, следовательно, пыление отсутствует. Кроме того, системы пневмотранспорта являются технологически гибкими, они могут иметь разную конфигурацию и дальность транспортирования в зависимости от требований Заказчиков.

В энергетической промышленности пневмотранспорт используется для перемещения угольной пыли, золы и шлака. Во всем мире на тепловых электростанциях сжигаются миллионы тонн угля. При этом качество сжигаемых углей является существенно разным в зависимости от мест угледобычи и угольных пластов. В результате сжигания твердого топлива образуются побочные продукты сжигания угля в виде золы и шлака, состав которых также существенно различен и зависит от качества сжигаемого угля и условий сжигания. И угольную пыль, и побочные продукты сжигания угля можно эффективно транспортировать пневматическим («сухим») способом, не применяя водные технологии, тем самым нанося минимальный ущерб окружающей природной среде и, в то же время, сохраняя потребительские свойства золы и шлака.

На ТЭС и котельных применяются различные системы транспортирования золошлаков [3]:

- механические системы золошлакоудаления (ЗШУ);
- гидравлические системы ЗШУ (гидрозолоудаление – ГЗУ);
- пневматические системы золоудаления (пневмозолоудаление – ПЗУ);
- комбинированные системы ЗШУ.

Установки транспорта золошлаковых материалов делятся на внутренние и внешние. Установки внутреннего пневмотранспорта золы предназначены для перемещения золы от бункеров электрофильтров до промежуточных бункеров (промбункеров) или силосов склада сухой золы. Установки внешнего пневмотранспорта золы предназначены для перемещения материалов от промбункеров или силосов склада сухой золы до золошлако-

<sup>1</sup> Статья подготовлена по результатам выполнения исследований по гранту РФФИ №12-08-31145 «Исследование критических скоростей пылегазовых потоков при перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах»

отвала. Согласно [3] на ТЭС в качестве установок внутреннего пневмотранспорта золы используются:

- самотечные установки;
- аэрожелоба;
- вакуумные установки;
- напорные установки со струйными, пневмокамерными и пневмовинтовыми насосами.

В статье представлены результаты обзора научно-технических источников информации по вопросу критических скоростей пневмотранспортирования мелкофракционных полидисперсных материалов в напорных установках при многообразии режимов перемещения сыпучих материалов с различными скоростями транспортирования пневмосмеси. Прежде всего, это режимы, в которых реализуется летучая транспортировка мелкофракционных полидисперсных материалов. При этом на критические скорости пневмотранспортирования существенное влияние оказывают фракционный состав и форма транспортируемых частиц. Самотечные установки не рассматривались, т.к. в таких системах основным определяющим параметром пневмотранспортирования является угол естественного откоса, а не фракционный состав материала, и форма частиц. В таких установках отсутствуют режимы летучей транспортировки сыпучих материалов. Пневмотранспорт в аэрожелобах также не изучался, т.к. в таких системах происходит движение в псевдооживленном слое, а не в режиме летучей транспортировки материалов. Кроме того, аэрожелоба не являются широко используемым оборудованием на ТЭС в связи с их крайней технологической негибкостью и малой дальностью транспортирования. Вакуумные установки применяются на ТЭС также достаточно редко в связи с рядом технических и технологических ограничений, и поэтому их исследование также нецелесообразно.

В России, Индии, Англии, Австралии и других странах проводились и проводятся исследования параметров работы и оборудования установок пневмотранспорта золы, угольной пыли и песка. В энергетике России долгие годы эксперименты по пневмотранспорту мелкофракционных полидисперсных материалов выполнялись на пневмогидротранспортном полигоне Сибирского филиала ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева (СибВНИИГ, г. Красноярск), который был демонтирован в 90-х годах XX в. Характерной особенностью этого полигона была возможность проведения на нем экспериментальных исследований на промышленно применяемом оборудовании с целью моделирования процессов пневмотранспортирования в широком диапазоне параметров, включая и запрещенные режимы, которые невозможно реализовывать на реальных эксплуатируемых пневмотранспортных установках ТЭС ввиду противоаварийных ограничений. В России около 85 % золошлаков ТЭС транспортируются системами гидрозолоудаления, и лишь около 15 % — системами пневмозолоудаления [4]. Однако, в настоящее время намечается переход от «мокрых» к «сухим» системам транспортирования золошлаков с целью использования данных продуктов в сухом виде [5].

## 2. РЕЖИМЫ ПНЕВМОТРАНСПОРТИРОВАНИЯ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Мелкофракционные полидисперсные материалы могут транспортироваться по трубопроводам порциями или непрерывным потоком – 24 часа в сутки, при необходи-

мости. Следует отметить, что в научно-технических источниках информации отсутствует единая терминология, характеризующая различные пневмотранспортные режимы. Согласно процессам, происходящим в трубопроводах пневмотранспортных установок, можно выделить две основных группы режимов пневмотранспорта: режимы летучей транспортировки и режимы транспортирования в псевдооживленном слое. Выбор режимов транспортирования материалов является очень важным фактором, который необходимо учитывать на этапе проектирования пневмотранспортных установок. В псевдооживленном слое транспорт сыпучих материалов осуществляется с использованием аэрожелобов, поэтому такой режим не исследовался. Основная группа исследуемых режимов – режимы летучей транспортировки сыпучих материалов.

### 2.1. Режимы летучей транспортировки сыпучих материалов

Подобные режимы транспортирования очень часто применяются для перемещения мелкодисперсных сыпучих материалов в различных отраслях промышленности. Во взвешенном состоянии частицы переносятся турбулизированным потоком со скоростями, в 2...5 раз превышающими скорости витания частиц. Пневмотранспорт в этом случае характеризуется большими расстояниями транспортировки (до 1500...2000 м) с производительностью до 300 т/ч и удельными расходами воздуха от 30...50 до 150...200 м<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> материала, увеличением скорости движения пневмосмеси по длине трубопровода (от 15...20 до 70 и даже 100 м/с) вследствие падения давления и расширения потока, значительным диапазоном концентрации пневмосмеси. Различают низкие (0,1...5,0 кг/кг), средние (5...10 кг/кг) и высокие (10...400 кг/кг) величины массовых концентраций [6].

#### 2.1.1. Пневмотранспорт низкоконцентрированных пылевоздушных потоков.

При таком режиме транспортирования смесь мелкофракционных полидисперсных материалов с воздухом движется вдоль трубопровода во взвешенном состоянии (рис.1).

При этом расход воздуха существенно превышает расход транспортируемого материала. По сравнению с транспортом материалов в высококонцентрированном потоке в этом режиме давление составляет меньшую ве-



Рис. 1. Пневмотранспорт низкоконцентрированной пневмосмеси во взвешенном состоянии

личину, а материалы транспортируются при высоких скоростях во взвешенном состоянии. Для поддержания транспортируемого материала во взвешенном состоянии необходимо обеспечивать минимальные транспортные скорости воздуха, составляющие для большинства материалов от 12,7 до 30,5 м/с [7].

Режим транспортирования в низкоконцентрированных пылевоздушных потоках характеризуется следующими параметрами [7]:

- высокой скоростью транспортирования – от 16,3 до 40,6 м/с;

- избыточным рабочим давлением от 34,5 до 82,7 кПа и разрежением от 13,55 до 40,64 кПа.
- низкой массовой концентрацией ( $< 0,5$ ).

Ограничения при применении режима транспортирования материалов с низкой массовой концентрацией [7]. При таком режиме необходимо обеспечить достаточно высокие расходы воздуха и транспортные скорости, что приводит к резкому росту энергозатрат. Для пневмотранспортных установок с низкой массовой концентрацией характерны также и другие следующие основные недостатки:

- повышенный абразивный износ трубопроводов;
- деградация транспортируемых хрупких материалов
- относительно малая дальность транспортирования.

Критические скорости в режиме пневмотранспортирования материалов с низкой массовой концентрацией [7]. Необходимо обеспечивать определенные критические скорости пневмотранспортирования для поддержания материала во взвешенном состоянии и движении. Слишком низкая скорость затрудняет транспортную способность материала в системе, а неоправданно высокие скорости способствуют росту потери давления, приводя к дополнительным энергозатратам для преодоления сопротивления в трубе. На транспортную скорость и, следовательно, и на расход воздуха сильное влияние оказывают характеристики материала: форма частиц, фракционный состав, средний размер частиц и их плотность. Все эти факторы влияют на критическую скорость пневмотранспортирования, потери давления, расход воздуха и т.д.

### 2.1.2. Пневмотранспорт высококонцентрированных пылевоздушных потоков

В отличие от режима транспортирования материалов с низкой концентрацией, при котором расход воздуха существенно превышает расход самого транспортируемого материала, и транспорт осуществляется при высоких скоростях движения потока, пневмотранспорт высококонцентрированных пылевоздушных потоков обладает существенным достоинством за счет эффективного «проталкивания» сыпучих материалов высокой концентрации при сравнительно небольших скоростях транспортирования в трубопроводе [7]. Такой режим транспортирования подходит для хрупких материалов. При этом отсутствует повышенный абразивный износ материала трубы. Скорость пневмотранспортирования в начале участка может составить всего 1 м/с для большинства перемещаемых материалов, а в конце участка – около 10 м/с. В режиме транспорта материалов с высокой концентрацией расход воздуха снижается до абсолютно минимума, при котором возможен транспорт материала в системе с максимальной плотностью.

При пневмотранспорте пылевоздушной смеси с высокой концентрацией материала в трубопроводах возможны следующие основные режимы:

- пневмотранспорт пылевоздушной смеси с осесимметричным распределением транспортируемого материала по всему сечению трубопровода;
- поршневой режим пневмотранспортирования сыпучих материалов;
- пневмотранспорт с применением встроенных или выносных байпасных линий.
- пневмотранспорт с подстилающим слоем.

### Пневмотранспорт пылевоздушной смеси с симметричным распределением транспортируемого материала по всему сечению трубопровода

Основные преимущества применения режима транспортирования в плотном потоке: повышение эффективности транспортирования из-за отсутствия проскока воздуха через транспортируемый материал; снижение абразивного износа вследствие меньшего контакта частиц со стенкой трубы; снижение скорости транспортирования материалов при тех же заданных условиях.

На рис.2 приведен пример режима транспортирования пневмосмеси высокой концентрации.

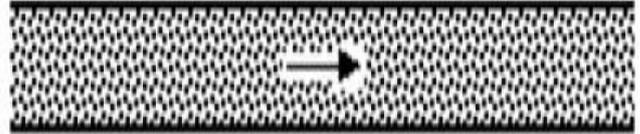


Рис. 2. Пневмотранспорт высококонцентрированной пневмосмеси

В таком режиме могут перемещаться сухие пылевидные, порошкообразные и мелкозернистые материалы при их аэрировании восходящим потоком до предельных значений массовой концентрации 1000...1500 кг/кг, с уменьшением насыпной плотности на 5...20 %. Аэрированные материалы приобретают свойства псевдожидкости и могут перемещаться по трубопроводам под действием перепада давления аэрирующего воздуха или самотёком – по желобам под уклон на ограниченные расстояния (до 60...80 м) со скоростями от 1,5 до 7 м/с, соизмеримыми со скоростями витания частиц и при соизмеримых расходах материала и несущей среды (1...5 кг/кг). Аэрирование при пневмоподъёме и при пневморазгрузке бункеров осуществляют подачей воздуха под массу транспортируемого материала, а при горизонтальном перемещении - попутным поддувом по длине транспортирования через гибкие шланги с выпускными клапанами вдоль трубопровода или через пористые перегородки в пневможелобах. Способ пневмотранспорта высококонцентрированных пылевоздушных потоков характеризуется перемещением значительного количества материала в трубах малого сечения (до 30 т/ч при диаметре 60 мм), небольшим износом труб и желобов, незначительным измельчением и истиранием перемещаемого материала, постоянством перепада давления по длине транспортирования и низкими удельными затратами энергии (до 1...1,5 кВт·ч/т) [6]. В этом случае скорость пневмотранспортирования – низкая и составляет менее 5 м/с. Таким образом, подобный способ является наиболее экономическим эффективным режимом пневмотранспортирования с точки зрения минимизации энергозатрат.

### Поршневой (пробочный) режим пневмотранспортирования сыпучих материалов

В поршневом режиме перемещают различные тестообразные материалы и бетонные смеси (отдельными пробками), штучные грузы (пневмопочта), капсулы, контейнеры (на роликах или воздушной подушке) и составы из них.

В трубопроводе материалы перемещаются со скоростями до 5... 15 м/с за счёт незначительной разности давлений воздуха (до  $10^4$  Н/м<sup>2</sup>) перед поршнем и за ним [6].

Один из примеров поршневого режима транспортирования полифракционных мелкодисперсных материалов с низкой скоростью представлен на рис.3.

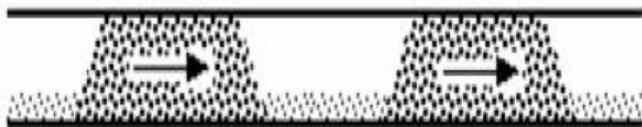


Рис. 3. Пневмотранспорт в пробочном режиме

При таких режимах транспортирования средняя скорость перемещения пневмосмеси составляет от 0,25 до 4 м/с. Режим применим для хрупких и легко повреждаемых материалов [7]. При этом часть материала до и после пробки транспортируется в зоне нижней образующей, образуя стационарный слой. Износ при таком режиме транспортирования - очень низкий, даже в случае перемещения абразивных материалов.

Идеальный поршневой режим пневмотранспортирования сыпучих материалов приведен на рис. 4.



Рис. 4. Идеальный режим поршневого пневмотранспортирования пневмосмеси

В таких режимах пневмотранспорт осуществляется в виде дискретных пробок с низкой скоростью движения пневмосмеси. Единственным его отличием от предыдущего режима является отсутствие стационарного слоя материала в нижнем слое [7]. Однако, на практике реализовать такой режим пневмотранспортирования материалов не представляется возможным.

#### Пневмотранспорт с применением встроенных или выносных байпасных линий

Еще одним видом летучей транспортировки материала является режим с использованием внутренних и выносных байпасов. В подобном режиме могут транспортироваться такие пылевидные сыпучие материалы, как алюминиевые и поликристаллические порошки, мелкодисперсный песок, крупная летучая зола. Согласно [7] скорости транспортирования пневмосмеси в трубопроводе составляют от 3 до 10,2 м/с, приводя к образованию пробок. Чем выше подпорное усилие, действующее на пробку, тем менее воздухопроницаемым становится материал. Для таких материалов необходимо подавать воздух через байпасную трубу в том месте, где воздух может транспортировать материалы, разделяя пробку.

В пневмотранспортных установках возможно применение различных видов байпасов. Так, например, на рис.5 и 6 приведены, соответственно, режимы пневмотранспортирования с внутренним байпасом транспортирующего воздуха и режим с дополнительной внешней подачей сжатого воздуха по длине пылепровода.

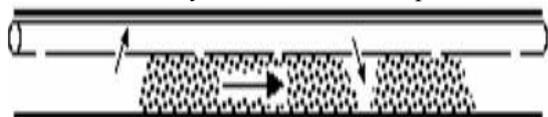


Рис. 5. Режим пневмотранспортирования с внутренним байпасом транспортирующего воздуха

Основные идеи данных режимов состоят в контроле длины пробки материала вдоль трубопровода и предотвращении ввода воздуха под давлением через транспортируемый материал [7].

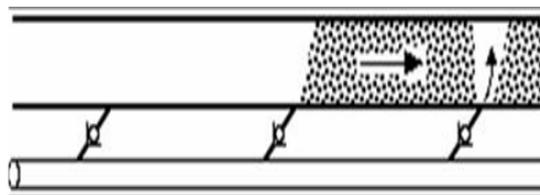


Рис. 6. Режим пневмотранспортирования с дополнительной подачей сжатого воздуха по длине пылепровода

#### 2.2. Пневмотранспорт с подстилающим слоем

При постепенном снижении скорости пневмотранспортирования более крупные частицы начинают выпадать из пылевоздушного потока на дно трубы со скоростью сальтации, в результате чего образуется подстилающий слой. На рис.7 представлен пример транспортирования мелкофракционных полидисперсных сыпучих материалов с подстилающим слоем. Режим характеризуется относительно невысокими скоростями. Эти скорости транспортирования ниже, чем при режимах транспортирования материалов с низкой концентрацией.



Рис. 7. Пневмотранспорт сыпучих материалов с подстилающим слоем

Для такого режима характерен сниженный абразивный износ трубопровода и отсутствие деградации транспортируемого материала. Поэтому в таких режимах эффективно транспортируются цемент, летучая зола, угольная пыль, песок и другие полифракционные мелкодисперсные абразивные сыпучие материалы [7].

Кроме перечисленных выше режимов транспортирования сыпучих материалов возможен пневмотранспорт полифракционных мелкодисперсных материалов в неустойчивых режимах. Однако, нестационарные режимы в работе не рассматриваются.

В отличие от режима транспортирования материала с низкой концентрацией режим пневмотранспорта высококонцентрированных пылевоздушных потоков является гораздо более чувствительным к изменениям свойств материалов: диаметру частиц, фракционному составу, форме, плотности, когезии и другим факторам.

### 3. АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ПО ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФОРМЫ И ПОЛИДИСПЕРСНОСТИ ЧАСТИЦ МЕЛКОФРАКЦИОННЫХ ПОЛИДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

#### 3.1. Обзор существующих источников научной информации по вопросу определения формы частиц мелкофракционных полидисперсных материалов

На режимы пневмотранспортирования мелкофракционных полидисперсных сыпучих материалов существенное влияние оказывает форма транспортируемых частиц. Форма частиц является такой характеристикой частиц, которую достаточно легко описать качественно, но трудно выразить количественно. Это связано с тем, что частицы имеют три размера, которые не являются равномерными. Пылевоздушный поток является полидисперсным и содержит большое количество частиц, имеющих самые разнообразные формы – от пластинчатых и

раковинообразных до сложных. Частицы микросфер, например, могут иметь форму, близкую к сферической. Частицы неправильной формы, имеющие большое количество выступов на поверхности, имеют различные статические и динамические характеристики по сравнению с частицами правильной формы. Частицы неправильной формы могут при определенных условиях гораздо быстрее образовывать более или менее устойчивые агломераты, чем частицы правильной кубической или сферической формы, приобретая при этом уже иные свойства этой одной вновь образовавшейся большей частицы другой формы. При уменьшении размера частиц значение их формы снижается. Таким образом, существует связь между размером и формой частиц [8].

В доступных научно-технических источниках информации не обнаружено одного общепринятого определения формы частиц, а также отсутствуют выражения (формулы) для расчета или оценки коэффициента формы частиц транспортируемых материалов. Есть различные подходы к понятию и определению формы частиц. Часто для определения формы частиц применяется термин «сферичность». Сферичность частиц  $\psi$  в соответствии с [8] определяется следующим образом:

$$\psi = \frac{\text{удельная поверхность сферы такого же объема, что и частица}}{\text{удельная поверхность частицы}}$$

Чем больше  $\psi$  отклоняется от 1,0, тем менее сферична частица.

Согласно [9] в зависимости от формы и характера поверхности зерна нерегулярной формы могут быть отнесены к одной из следующих групп:

- округлые частицы с гладкой поверхностью (например, галька, обкатанный речной песок, микросферы);
- округлые и цилиндрические частицы с шероховатой поверхностью (активированный уголь, сорбенты, катализаторы);
- частицы с изломами и трещинами резко неправильной формы (щебень, горный песок, кокс, руда, каменный уголь, сланец, катализаторы синтеза аммиака, дробленый керамзит).

В табл. 1 приведены величины коэффициента формы для характерных материалов в соответствии с данными авторов [9].

Таблица 1. Величины коэффициента формы для типовых материалов

№ п/п	Название материала	Коэффициент формы
1.	Каменный уголь, кокс металлургический	0,45
2.	Алюмосиликаты, силикагели, алюмогели	0,50
3.	Антрацит	0,67
4.	Щебень, гравий, песок горный	0,70
5.	Песок округлый и галька	0,75
6.	Активированный уголь формованный	0,80

Согласно [10] коэффициент формы — отношение поверхности частицы неправильной формы  $S$  к поверхности шара  $S_3$ , объем которого равен объему несферической частицы:

$$S_3 = \pi d_3^2 = \pi \left( \frac{6W}{\pi} \right)^{2/3} \quad (1)$$

$$k_f = \frac{S}{S_3} = 0,202 \frac{S}{W^{2/3}} \quad (2)$$

где  $W$  — объем сферы,  $\text{мм}^3$ .

В соответствии с [10] для шара  $k_f=1$ , для других тел  $k_f > 1$ . По мнению авторов [11] величина, обратная коэффициенту формы, называется коэффициентом сферичности  $\psi$ , а для частицы любой другой формы  $\psi < 1$ .

Помимо коэффициента  $k_f$  твердая частица неправильной формы может быть охарактеризована динамическим коэффициентом формы  $k_f^0$ . Он равен отношению коэффициента сопротивления частицы произвольной формы к коэффициенту сопротивления шарообразной частицы [12].

В источниках [13] и [14] коэффициент формы также выражают через отношение квадратов эквивалентных диаметров  $d_3$  и  $d_3'$ , где  $d_3$  является диаметром эквивалентной частицы сферической формы, объем которой  $W$  равен объему рассматриваемой частицы [10]:

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6W}{\pi}} \quad (3)$$

а  $d_3'$  — диаметр шара, поверхность которого равна поверхности зерна несферической формы [10]:

$$d_3' = \frac{S}{\pi} \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент формы выражается формулой (5):

$$k_f = \left( \frac{d_3'}{d_3} \right)^2 \quad (5)$$

По мнению авторов [10] коэффициент формы  $k_f$  является коэффициентом сферичности частицы.

Для частиц, по форме резко отличающихся от сферы, выражать эквивалентный диаметр в виде диаметров сфер, эквивалентных им по объему или поверхности, может оказаться недостаточным. Поэтому авторы [15] предлагают пользоваться седиментационным диаметром, который находят по отношению поверхности частицы к ее объему. Указанные авторы исходят из справедливости допущения, что отношения поверхности к объему у шарообразной частицы и у частицы неправильной формы должны быть одинаковыми.

В соответствии с [17] в случае описания свойств материала частиц, имеющих неправильную форму, применяется понятие геометрического коэффициента формы  $k_f$ . Альтернативой ему является обратная величина, которая называется коэффициентом сферичности  $\psi$ , т.е.  $\psi=1/k_f$ . Коэффициент  $k_f$  является отношением поверхности частицы  $S$  к поверхности равновеликого шара  $S_3$ :

$$k_f = \frac{S}{S_3} = \left( \frac{d_3'}{d_3} \right)^2 \quad (6)$$

где  $d_3$  и  $d_3'$  — диаметры шаров, которые эквивалентны частице по поверхности и по объему.

В общем случае  $k_f \geq 1$ ,  $0 < \psi \leq 1$ ; для сферических частиц материала  $k_f = \psi = 1$ . Коэффициенты  $k_f$  и  $\psi$  для тел правильной формы можно найти по табл.3. Если рассматриваются частицы материала неправильной формы, то значения коэффициентов  $k_f$  и  $\psi$  необходимо определять экспериментально; приблизительную оценку этих коэффициентов можно провести, используя табл. 4. Для оценочных расчетов можно воспользоваться табл. 5.

Таблица 2. Геометрические коэффициенты формы для некоторых материалов [16]

№ п/п	Материал	Агрегатная плотность частиц, кг/м <sup>3</sup>	Преобладающая форма частиц	Геометрический коэффициент формы
1.	Вспученный перлит	2280	Округлые и продолговатые с ноздревой поверхностью	1,3...1,5
2.	Порошок из вспученного перлита	2350...1850	Тонкие пластинки	2,0...2,1
3.	Вермикулит	2750	Тонкие пластинки	1,9...2,0
4.	Вспученный вермикулит	1200...1000	Пластинки	1,4...1,5
5.	Молодая слюда	2700	То же	2,0...2,1
6.	Тальк	2750	Таблетки	1,15...1,2
7.	График	2000...2400	Плоские и угловатые	1,18...1,2
8.	Кварцевый песок	2650	Угловатые	1,15...1,2

Таблица 3. Коэффициенты формы и сферичности некоторых правильных тел

Тело	Тетраэдр	Куб	Октаэдр	Додекаэдр	Икосаэдр
$k_f$	1,49	1,24	1,18	1,10	1,07
$\psi$	0,670	0,806	0,846	0,912	0,937

Продолжение таблицы 3. Коэффициенты формы и сферичности некоторых правильных тел

Призма			Цилиндр							
$a \cdot a \cdot 2a$	$a \cdot 2a \cdot 2a$	$a \cdot 2a \cdot 3a$	$h = d/2$	$h = d/6$	$h = d/20$	$h = d/30$	$h = d$	$h = 1,5d$	$h = 5d$	$h = 10d$
1,30	1,31	1,38	1,21	1,68	3,10	4,55	2,28	1,16	1,45	1,72
0,767	0,761	0,725	0,827	0,594	0,323	0,220	0,438	0,860	0,691	0,580

Таблица 4. Коэффициенты формы и сферичности некоторых материалов

Форма частиц материала	$k_f$	$\psi$
Округлые, окатанные, без резких выступов: глина, шамот, речной песок, короткие цилиндры и пр.	1,16...1,20	0,83...0,86
Острозернистые, шероховатые, продолговатые: антрацит, неокатанный песок и пр.	1,54	0,65
Песок:		
- круглый	1,20	0,83
- угловатый	1,37	0,73
- остроугольный	1,67	0,60
среднее значение для всех видов песка	1,33	0,75
Вольфрамовый порошок	1,12	0,89
Железный катализатор	1,73	0,58
Активный уголь		
$d = 1...2$ мм	1,56	0,64
$d = 1,5$ мм	1,09	0,92
$d = 1,5...4,5$ мм	1,27	0,79
Сланец		
$d = 2,5...11,2$ мм	2,35	0,426
$d = 34...62,5$ мм	1,32	0,758
Каменный уголь		
$d = 6...11,25$ мм	1,87	0,536
Металлургический кокс		
$d = 6...11,25$ мм	2,48	0,403
Гравий		
$d = 12...20$ мм	1,47	0,68
$d = 3,7$ мм	1,38	0,725
Пыль		
- угольная естественная	1,54	0,65
- угольная размельчённая	1,37	0,73
- колосниковая оплавленная, сферическая	1,12	0,89
- колосниковая агрегированная	1,82	0,55
Слюда (хлопья)	3,57	0,28
Стекло дроблёное, неоплавленное	1,54	0,65
Поливинилхлорид суспензионный	1,47	0,68
Силикагель	3,03...5,56	0,18...0,33
Алюмосиликагель	1,82...4,0	0,25...0,55
Кольца Рашига, седла Берля	3,3	0,3
Щебень		
$d = 5...7$ мм	1,85	0,54
$d = 25...30$ мм	1,61	0,62
Прокаленный оксид алюминия	2,32	0,43

Таблица 5. Оценка коэффициентов формы и сферичности некоторых частиц материалов

Характеристика формы частицы материала	$k_f$	$\psi$
Округлые	1,30	0,77
Угловатой формы	1,52	0,66
Продолговатые	1,72	0,58
Пластинчатые	2,33	0,43

**3.2. Краткие результаты анализа источников научно-технической информации по вопросу влияния полидисперсности материала на критические скорости пылегазовых потоков**

Если слой сыпучего материала состоит из частиц одинакового размера, то его называют монодисперсным, слой из частиц существенно разного размера называют полидисперсным. Таким образом, полидисперсность материала – характеристика его неоднородности по размеру частиц. Полидисперсность материала характеризуется гранулометрическим составом, который показывает, какую долю или процент по массе, объему или числу частиц составляют определенные частицы или группы частиц во всей анализируемой пробе.

Существует множество определений дисперсности материала [18], например:

1. Дисперсность – характеристика размеров частиц в дисперсных системах.
2. Дисперсность – физическая величина, характеризующая размер взвешенных частиц в дисперсных системах.
3. Дисперсность (раздробленность) – степень измельчения какого-либо тела (дисперсность фазы) в однородной среде (дисперсионной среде). Мера дисперсности

- отношение общей поверхности всех частиц к их суммарному объему.

4. Дисперсность – характеристика пылевидного материала (цемента, минерального порошка и т. д.) по удельной площади поверхности (см<sup>2</sup>/г) или по массе порошка, прошедшего через сито определенного размера.

5. Дисперсность – степень раздробленности, определяемая величиной, обратной поперечному размеру частицы; чем мельче частицы, тем больше дисперсность. Или: величина, обратная размеру частиц дисперсной фазы.

Гранулометрический состав мелкофракционных полидисперсных сыпучих материалов характеризуется интегральным показателем крупности частиц этого материала, иногда называемым в научно-технических источниках средним или эквивалентным диаметром частиц. Существуют различные способы определения интегрального показателя крупности частиц материала, приводимые разными авторами. В настоящее время для определения гранулометрического состава мелкозернистых материалов с размерами частиц от 0,5 мкм до нескольких мм наиболее широко используют ситовый рассев, микроскопию, лазерную гранулометрию, седиментацию.

В табл. 6 представлены формулы для вычисления интегрального показателя крупности частиц материала.

Таблица 6. Способы определения интегрального показателя крупности частиц

№ п/п	Название	Формула	Примечание	Источник информации
1.	Средний арифметический диаметр	$d_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i n_i}{n} \quad (10)$	$n$ — общее число частиц, $n_i$ — число частиц $i$ -й фракции, $d_i$ — средний диаметр частиц $i$ -й фракции	[17]
2.	Геометрический диаметр	$d_{geo} = \frac{\sum_{i=1}^n (\lg d_i \cdot n_i)}{n} \quad (11)$		[10]
3.	Средний квадратичный диаметр (средний поверхностный диаметр)	$d_{S_{cp}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 n_i}{n}} \quad (12)$	Суммарная поверхность частиц равна поверхности частицы со средним диаметром, умноженной на число частиц	[17]
4.	Средний объемный диаметр	$d_{V_{cp}} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^3 n_i}{n}} \quad (13)$		[10]
5.	Средний поверхностно-объемный диаметр (средний диаметр по Саутеру)	$d_{V_{S_{cp}}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{\sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (14)$		[10]
6.	Средний гармонический диаметр	$d_{cp_{гарм}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{d_i}} \quad (15)$	$y_i$ — счетная доля частиц $i$ -й фракции; удельная поверхность частиц диаметром $d_{cp}$ равна средней удельной поверхности рассматриваемых частиц	[17]
7.	Средний диаметр по массе	$d_{cp_{м}} = \sum_{i=1}^n g_i d_i \quad (16)$	$g_i$ — массовая доля частиц	[17]
8.	Медианный диаметр	$d_{med}$	Диаметр частиц, определяемым по 50%-ному содержанию частиц по массе	—
9.	Модальный диаметр	$d_{mod}$	Среднеарифметический диаметр частиц, принадлежащих к одной группе фракций, имеющей максимальное массовое содержание в пробе	—
10.	Средневзвешенный диаметр	$d_{cp_{вз}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \cdot m_i}{100} \quad (17)$	$d_i$ — средний размер частиц $i$ -й фракции ситового анализа, определяемый как полусумма размеров отверстий двух соседних сит, $m_i$ — %-ное содержание $i$ -й фракции по массе (остатки на ситах)	[19]

Определение модального диаметра частиц. На гистограмме, построенной в прямоугольных координатах (рис. 8), где по оси абсцисс отложен диаметр частиц по фракциям, а на оси ординат — содержание фракций в %, точка, фиксирующая максимум содержания, называется модой, а соответствующий ей диаметр - модальным диаметром [18].

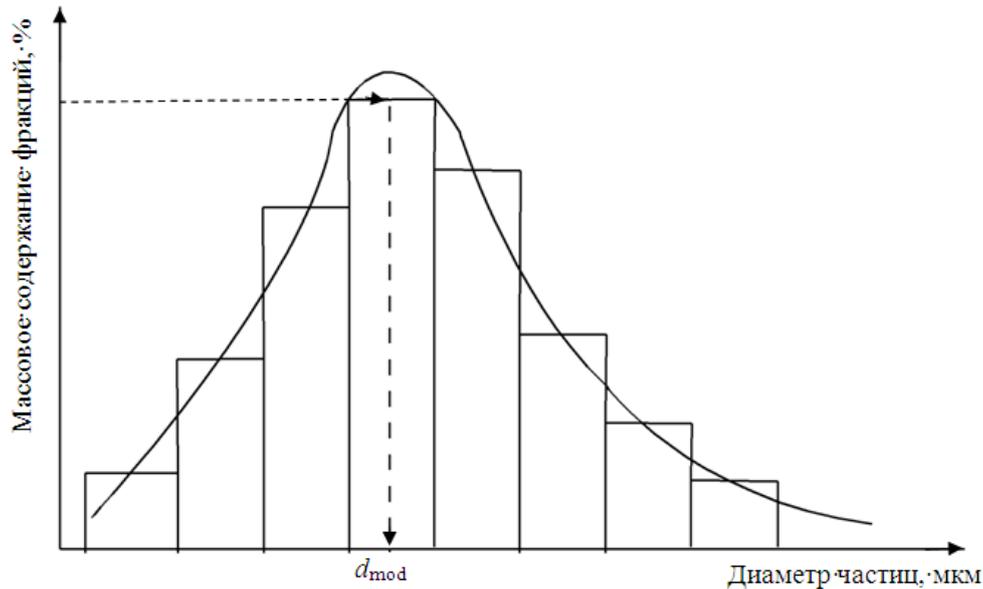


Рис. 8. Дифференциальное распределение частиц по фракциям с определением модального диаметра.

Определение медианного диаметра частиц. Медианный диаметр получают на кумулятивной кривой, построенной на графике, где по оси абсцисс отложен диаметр фракций, а по оси ординат - их нарастающее суммарное содержание (рис. 9). Точка на кривой, где содержание составляет 50 %, называется медианой, а соответствующий ей диаметр - медианным диаметром [18].

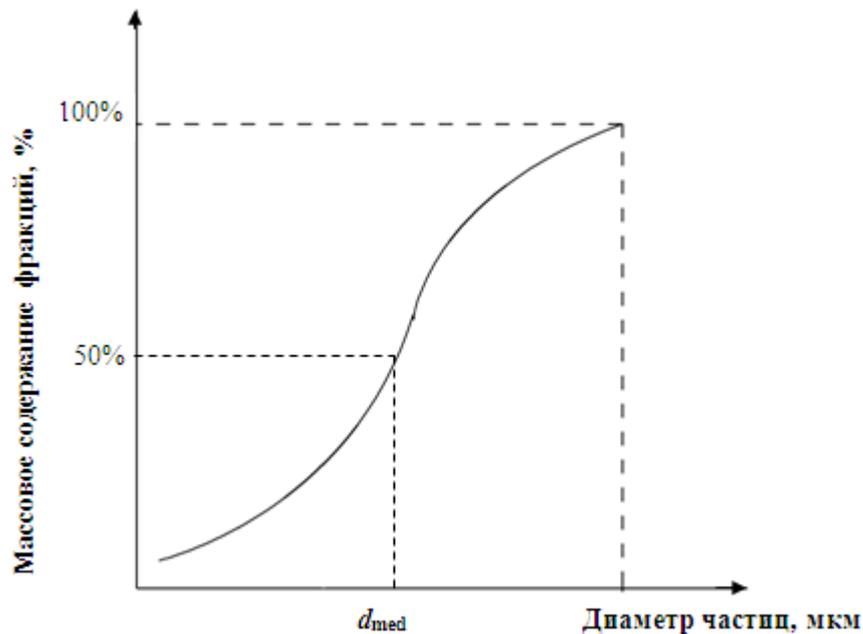


Рис. 9. Интегральное распределение частиц по фракциям с определением медианного диаметра

Для определения средневзвешенной крупности частиц использовалась формула (17) из [19], т.к. она позволяет наиболее полно учитывать гранулометрический состав материала и является, по мнению авторов статьи, интегральной для оценки среднего диаметра.

Косвенным образом полидисперсность учитывается при определении средневзвешенного диаметра частиц, однако, этого недостаточно для учета влияния полидисперсности разнофракционных сыпучих материалов на величины критических скоростей пылегазовых потоков при их перемещении в пневмотранспортных трубопроводах. Необходимо разработать коэффициент полидис-

персности, который учитывается в расчете критических скоростей пылегазовых потоков при перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах.

По данным из [20], чем больше коэффициент полидисперсности  $k_d$ , тем более одинаковые частицы. Авторы из [21] считают, что коэффициент полидисперсности угольной пыли экибастузского угля, размолотого с использованием валковых среднеходных мельниц, равен 0,85. В [22] приводится, что  $k_d$  при размоле бурого угля в шаровых барабанных мельницах составляет 0,85, а при размоле в молотковых мельницах — 1,2...1,3. Согласно

данным из [23]  $k_d$  составляет от 0,6 до 1,3. Авторы из [24] полагают, что  $k_d$  находится в пределах 0,8...1,4. В соответствии с [24]  $k_d$  принимается для песка равным 1,0, для мелкокусковой руды — 1,4 и для извести — 21. Приведенные величины коэффициента получены для материалов, средний размер частиц которых менее 1 мм. Величина  $k_d = 21$  получена для извести, содержащей 20 % (по массе) частиц размером от 1 до 2 мм. Кроме приведенных выше сведений о величинах  $k_d$  из [24], в [25] приведен диапазон изменения  $k_d = 0,8...1,3$  для опытов с золой при изменении среднего диаметра частиц от 50 до 90 мкм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа исследованных 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 следующее:

- исследования, проводившиеся в разных странах, содержат результаты применительно к конкретным условиям транспортирования материалов;
- в проведенных экспериментальных исследованиях не учитывалось влияние формы и полидисперсности частиц на критические скорости пылегазовых потоков;
- в научно-технических источниках информации не найдены формулы для определения коэффициентов формы и полидисперсности частиц мелкофракционных полидисперсных материалов.

Необходимо проведение дополнительных научных исследований формы и полидисперсности различных мелкофракционных полидисперсных материалов с целью уточнения зависимости для расчета критических скоростей пылегазовых потоков при перемещении мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах с учетом коэффициентов формы и полидисперсности частиц.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. <http://www.pdengineer.com/courses/m/M-5013.pdf>
2. G.E. Klinzing, F. Rizk, R. Marcus, L.S. Leung. Pneumatic Conveying of Solids: A theoretical and practical approach (Particle Technology Series). ISBN 9048136083; 2010 г.
3. **Современные** природоохранные технологии в электроэнергетике: Информационный сборник / под общей ред. В.Я. Путилова. М.: Издательский дом МЭИ, 2007 – 388 с.: ил.
4. **Экология** энергетики. Учебное пособие для вузов / Под общ. ред. В.Я. Путилова. М.: Издательство МЭИ, 2003. — 716 с.: ил.

5. V. Putilov, I. Putilova. Properties of coal ash in Russia / Proceedings of the II EuroCoalAsh Conference 2010, May 27-28, 2010, Copenhagen, Denmark. -pp.95-100
6. [http://ex-kavator.ru/dic/encgeo.php?dic\\_tid=3899](http://ex-kavator.ru/dic/encgeo.php?dic_tid=3899)
7. <http://www.cedengineering.com/upload/Pneumatic%20Conveying%20Systems.pdf>
8. George E. Klinzing .Gas-solid transport. McGraw-Hill, Inc., 1981, 175 p.
9. М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. Ленинград «Химия». Ленинградское отделение, 1979.
10. И.М. Разумов. Пневмо- и гидротранспорт в химической промышленности. М. Издательство «Химия», 1979.
11. А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. Трубопроводный транспорт концентрированных смесей. М. Машиностроение, 1973.
12. А.Е. Смолдырев. Гидро- и пневмотранспорт. М. Металлургия, 1975.
13. А.П. Юфин. Изв. АН СССР, сер. техн., 1949, №8, с. 11466-11469.
14. E. Kriegel, H. Brauer. –V.D.J. – Forschungsheft, 1966, # 515, S. 5-36.
15. Н.И. Аксенов – В кн.: Сборник научных трудов Магнитогорского горно-металлургического ин-та им. Г.Н. Носова, 1973, вып. 138, с. 116-118.
16. А. Корзиси, Т. Яги, Т. Окуда. – Кован гидзюцу кенкюсе хококу, 1973, v. 12, №3, p. 245-247, 249-259.
17. <http://www.prosushka.ru/53-svoystva-sypuchix-materialov.html>
18. <http://www.kladoiskatel.ru/glossary/mediannyi-i-modalnyy-diameter-zeren.html>
19. **Рекомендации** по аэродинамическому расчету вакуумных систем пневмозолоудаления: П60-77/ВНИИГ. Л.: 1977.
20. <http://all4study.ru/parovie-kotli/process-razmola-ugolnoj-pyl-i-ee-svoystvax.html>
21. [http://gendocs.ru/v837/%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA\\_%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5\\_%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B8\\_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C\\_1?page=10](http://gendocs.ru/v837/%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%83%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BA%D0%B8_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C_1?page=10)
22. [http://www.termodynamika.ru/ref/ko8fficient\\_polidispersnosti.html](http://www.termodynamika.ru/ref/ko8fficient_polidispersnosti.html)
23. <http://coolforengineers.net/tvyordoe-toplivo/>
24. Мюллер Э., Польштир К. Износ пневмотранспортных трубопроводов. Черные металлы, 1964, №21, С. 32-39.
25. Попов А.Г. Износ стали 20 золой экибастузского угля. // Теплоэнергетика, 1987, №8, с. 40-44.

**И.В. Путилова, В.Я. Путилов, А.Р. Хасянишина.** Исследование влияния формы и полидисперсности частиц на критические скорости пылегазовых потоков при транспортировании мелкофракционных полидисперсных материалов в пневмотранспортных трубопроводах // Энергосбережение и водо-подготовка, №4, 2014, с. 47-52.