

УДК 628.511

## МЕТОДОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ СДУВАЕМОСТИ ПЫЛИ ОТ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Симаков В.С.<sup>1</sup>, Шевцов Е.И.<sup>2</sup>, Сандула Т.А.<sup>3</sup>, Байбусинова О.Р.<sup>4</sup>, Постникова Е.А.<sup>5</sup>,  
Сергина Н.М.<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup>Волгоградский государственный технический университет, 400001, г. Волгоград, Академическая ул., 1,  
e-mail: <sup>1</sup>[p.o.t.u.@mail.ru](mailto:p.o.t.u.@mail.ru), <sup>2</sup>[shevtsoveivlg@gmail.com](mailto:shevtsoveivlg@gmail.com)

**Аннотация.** Проведение испытаний по определению удельной сдуваемости пылящих материалов является актуальной задачей в связи с давно назревшей необходимостью уточнения и расширения применяемых методических пособий по расчету выбросов пыли от неорганизованных источников. Процесс пыления сопровождается переносом на большие расстояния мелких твердых частиц пыли  $PM_{10}$  и  $PM_{2.5}$ , признанных ВОЗ опасным загрязнителем. Однако сама процедура определения характеристик удельного и максимального удельного сдува в литературе приводится фрагментарно. Используемая установка описывается поверхностно или приводятся только таблицы с полученными данными. Целью данной статьи является обобщение представленного в литературе опыта и нашего практического опыта: представляется аэродинамическая модель трубы, физическая модель уноса пыли, теоретические предпосылки, сравнение наших данных с данными из Новороссийской методики, а также приводится эксперимент, показывающий влияние дисперсного состава на характеристики сдуваемости пыли.

**Ключевые слова:** удельные показатели сдуваемости пыли,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , аэродинамическая труба, песчано-гравийная смесь, гипс, скорость сдувания

### ВВЕДЕНИЕ

В методиках [1, 3, 4] приводятся удельные показатели сдуваемости и необходимые рекомендации по расчету выбросов, но не приводится или приводится неполная информация про то, как они были установлены. Экспериментальному исследованию сдуваемости пыли с поверхностей посвящены работы ряда авторов [2, 5-11], а также патенты [12, 13].

Все исследования производились с помощью аэродинамической трубы и основным принципом было измерение на лабораторных весах количества пыли до и после воздействия потоком ветра известной скорости в течение определенного времени. Среди целей данных исследований было: определение скорости срыва частиц, зависимость скорости срыва от диаметра частиц, условия, при которых пыление снижается, и, конечно, определение показателей удельной сдуваемости, которые можно применять в расчетах. Существует достаточно большое количество статей и работ по цифровому моделированию процесса сдува, в них отличается сложность проведения экспериментальных исследований и скудность имеющихся данных.

Из описания исследований на данную тему мы узнаем следующее:

1. Сдувание пыли – сложный процесс, который зависит от степени дисперсности и формы пылинки, минералогического и химического состава пыли, удельного веса, величины сцепления с поверхностью, влажности и скорости воздушного потока.

2. Процессу сдува чаще всего предшествует процесс перекачивания частиц из-за того, что тангенциальные силы преобладают над нормальными.

3. Гранулометрический состав влияет на удельную сдуваемость. При большом количестве мелкодисперсной пыли (эквивалентный диаметр  $<50$  мкм) частицы плотно слипаются и интенсивность сдува снижается

4. Установка по сдуванию пыли как правило состоит из центробежного вентилятора с электродвигателем, трубы диаметром более 10 см, спрямляющей решетки (рассекателя), полки для размещения на ней образца пыли и анемометра. К ней также прилагаются аналитические весы и лабораторные сита для получения пыли желаемого гранулометрического состава.

Предлагается ведение видеофиксации, что позволяет повторно наблюдать процесс и сравнивать его с данными, полученными измерениями. Данные рекомендации и опыт были учтены при разработке нашей экспериментальной установки для проведения аналогичных исследований.

### АЭРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРУБЫ

Аэродинамическая модель потока воздуха в трубе представляет собой экстремально важный вопрос при сдувании пыли, так как при сравнительно небольших изменениях соотношений размеров и конфигураций внутри трубы показатели удельного сдува могут немного возрасти или очень сильно снизиться. Например, от расположения пластины посередине трубы или чуть ниже ее скорость изменится незначительно. А если положить пластину на стенку трубы или перекрыть пластинкой всё сечение трубы, даже если она будет находиться посередине, то процесс сдува замедлится или полностью прекратится. Можно сказать, что на удельные показатели сдуваемости пыли внутри аэродинамической трубы оказывает влияние как скорость потока воздуха, так и завихренность. Нами было выбрано положение пластины чуть ниже центра трубы: во-первых, из-за практических соображений; во-вторых, таким образом мы избежали сильных завихрений внутри трубы, которые показало моделирование потока воздуха в программе Solidworks, которая использовалась для аналогичных расчетов в исследованиях [14-17].

При установке пластины в центр мы бы получили завышенные значения из-за максимальной скорости потока воздуха в этом месте трубы и из-за существенно большего завихрения, что показало моделирование. Поднимать пластину выше центра как практически неудобно, так и не имеет смысла из-за неадекватного моделирования горизонтальной ветровой нагрузки. На рисунках 1 и 2 представлена выбранная нами путем компьютерного моделирования, а также из практического опыта модель аэродинамической трубы. На рисунке 1А показано распределение скорости на пластине, с которой производился сдув, а на рисунке 1Б — завихренность. На рисунках 2А и 2Б в виде сбоку представлена модель потока воздуха в аэродинамической трубе, обтекающего пластину. На всех изображениях 1-2 поток воздуха направлен слева направо. Диаметр трубы, применяемой в нашем исследовании, составил 200 мм.

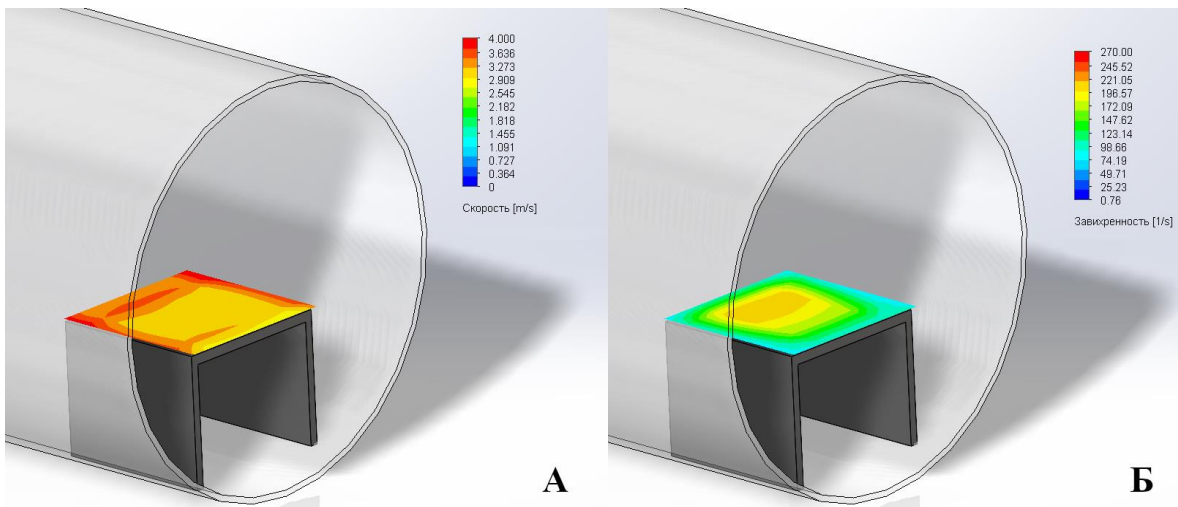


Рис. 1. Аэродинамическая модель пластины. А – скорость потока на пластине, м/с; Б – завихренность, 1/с.

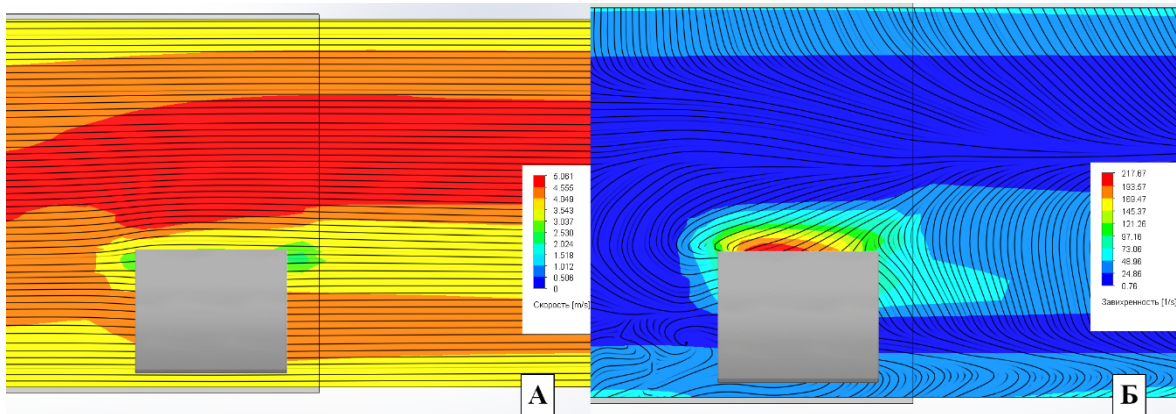


Рис. 2. Аэродинамическая модель потока воздуха, обтекающего пластину А – скорость потока воздуха, м/с; Б – завихрения потока воздуха, 1/с.

### ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СДУВА ПЫЛИ

В книге [2] предлагается физическая модель для определения критической скорости срыва частиц. Исходя из наблюдений, отрыву частиц предшествует стадия перекатывания, так как нормальная составляющая силы на частицу намного меньше тангенциальной. Для определения критической скорости срыва пыли рассматривается перекатывание монодисперсных частиц шарообразной формы. При обтекании пылевых частиц турбулентным воздушным потоком на границе с их поверхностью образуется турбулентный пограничный слой, который имеет ламинарный подслой. На рисунке 3 представлены силы, действующие на пылевые частицы во время сдува. Среди них сила собственного веса:

$$G = mg \tag{1}$$

Сила давления воздушного потока в направлении скорости:

$$F_u = \psi_{\text{л}} \frac{u^2 \rho}{2} S \tag{2}$$

Где  $\psi_{\text{л}}$  — коэффициент лобового сопротивления;  $u$  — скорость воздушного потока, м/сек,  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $S$  — сечение частицы, м<sup>2</sup>;

Сила трения, которая направлена в сторону, противоположную перемещению, и пропорциональна нормальному давлению частицы на поверхность:

$$T = mgf \cos \alpha \tag{3}$$

Здесь  $f$  — коэффициент трения;  $\alpha$  — угол наклона плоскости; Составляющая силы тяжести по касательной к поверхности, направленной в сторону уклона:

$$F_x = mg \sin \alpha \tag{4}$$

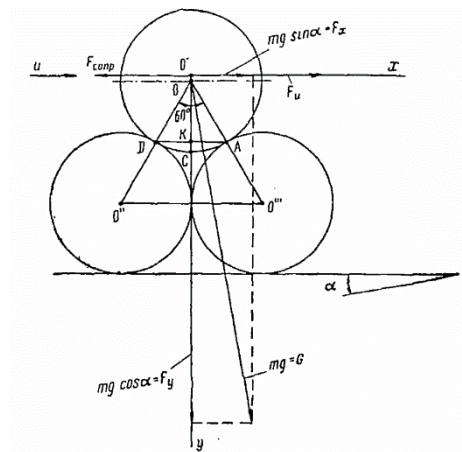


Рис. 3. Схема действия сил на частицу

Исходя из представленной физической модели можно вывести, что критическая скорость воздушного потока, при котором будет наблюдаться перекатывание шарообразных монодисперсных пылевых частиц должна быть:

$$u > \sqrt{\frac{r \rho_{\text{ч}} g (k'' \cos \alpha \pm k''' \sin \alpha)}{k' \psi_{\text{л}} \rho_{\text{в}}}}, \text{ м/с} \tag{5}$$

Здесь  $k', k''$  и  $k'''$  — константы, равные 1.423, 2.094, 3.908. Данные константы выводятся из геометрических соображений и предпосылок. Полученное выражение применимо для определения минимальной скорости потока воздуха, при котором наблюдается перекатывание частиц и срыв, но

данная модель исходит из упрощений в виде монодисперсных круглых частиц, поэтому в настоящий момент получение реальных и экспериментальных данных представляет собой большое значение.

### ПРОЦЕДУРА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УДЕЛЬНОГО СДУВА ПЫЛИ

Исходя из практики и теоретических соображений, была выведена общая последовательность действий для определения искомых удельных показателей. Образец проводится через сито с ячейками размером 200 мкм. Использование сита является на самом деле единственным решением для данного эксперимента, потому что проведение исследований сдува непосредственно с образца сопряжено с рядом трудностей, которые на настоящий момент являются непреодолимыми. Во-первых, крупные частицы любого вещества имеют очень крупный вес, что приведет как к очень высоким весовым показателям сдува, так и к огромному разбросу полученных значений. Если исследовать сдвиг крупных частиц, то их взаимное расположение будет иметь большее значение, чем характеристики материала, что делает такие испытания практически бессмысленными, по крайней мере на небольших по размеру установках. Во-вторых, частицы с эквивалентным диаметром более 200 мкм имеют очень высокую скорость оседания, то есть без постоянно поддерживающего их потока воздуха они осядут практически мгновенно, что полностью отменяет риск их переноса на существенные расстояния, кроме случая попадания в ветряную бурю. В-третьих, мы подробно исследуем именно максимальный удельный сдвиг по аналогии с Новороссийской методикой.

Частицы диаметром 100-200 мкм увеличивают сдвиг, в то время как частицы с большим диаметром снижают сдвиг, так как имеют больший вес, о чем говорилось ранее. Таким образом, применение сита с размерами ячеек 200-250 мкм позволяет получить выборку пыли, для которой есть риск переноса на значительные расстояния, а также которая будет максимально подвержена сдвигу. То есть удастся получить характеристики максимально удельного сдува, о которых говорится в существующих расчетных методиках. Далее, для проведения расчета рассеивания, требуется оценить соотношение частиц диаметром 0-200 мкм к массе исходного материала, чтобы уточнить реальные показатели удельной сдуваемости, а также учесть коэффициенты, зависящие от конфигурации на конкретном складе.

После проведения пылящего материала через лабораторное сито, он упаковывается в маркированную коробочку для удобного использования во время опытов. Применяемая нами пластина для помещения на нее пылевой навески состоит из подставки и, собственно, пластины. Подставка устроена таким образом, чтобы через нее свободно проходил поток воздуха, а также чтобы была возможность ее утяжеления. На пластину устанавливается трафарет, в нашем случае с размерами 6 на 6 см, с помощью которого на пластину синтетической кистью наносится навеска в форме квадрата. Пластина помещается на лабораторные весы, и записывается нанесенное количество пыли, например, 10 г или больше. Необходимо обеспечить наличие слоя пыли на пластине в течение всего эксперимента. Если слой материала заканчивается слишком быстро, то либо снижается скорость потока воздуха, либо увеличивается количество материала на пластине, и опыт повторяется. После нанесения через трафарет пыли, пластина вставляется в подставку, как показано на рисунке 3.



Рис.3. Пластина на подставке с навеской гипсовой пыли.

Затем, при помощи дифференциального манометра ДМЦ-01, в центре сечения трубы проверяется скорость установленного с помощью трансформатора и радиального промышленного вентилятора СовПлим потока воздуха. Образец помещается примерно посередине трубы, после чего он подвергается ветровому воздействию в течение известного количества времени, обычно 3 минуты. Подробнее о продолжительности эксперимента в следующем подзаголовке текста. Продолжительность эксперимента должна зависеть от размеров трубы, от исследуемого параметра, а также от количества пыли, которое было помещено на пластину. Затем вентилятор выключается, образец извлекается из трубы, и пластина повторно взвешивается. Определение удельного сдува рассчитывается по формуле:

$$q = \frac{m_1 - m_2}{t \cdot S} \quad (6)$$

Здесь,  $q$  – удельная сдуваемость ( $\text{г} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ );  $m_1$  – исходная масса навески пыли, г;  $m_2$  – масса навески пыли после процесса сдува, г;  $t$  – время воздействия на образец потоком воздуха, с;  $S$  – площадь навески пыли на пластине,  $\text{м}^2$ . Таким образом, получается удельный показатель сдува пыли для некоторой определённой скорости. Эксперимент затем повторяется при отличной скорости потока воздуха для новой навески пыли того же вещества. По нашему опыту, самыми ключевыми являются удельные значения сдува для скоростей 2, 5 и 10 м/с, но уточнить данные можно, находя коэффициент сдува и при других значениях скорости потока воздуха. Получив таблицу зависимости коэффициента сдува от скорости потока воздуха, можно построить по этим данным степенную функцию, которая имеет вид:

$$Q = aV^b \quad (7)$$

Здесь,  $Q$  – степенная функция зависимости удельного сдува от скорости потока воздуха;  $a$  и  $b$  – эмпирически определенные коэффициенты. Данное уравнение получается методом регрессионного анализа, позволяет обобщить полученные экспериментальные данные с целью их использования для расчета удельных характеристик сдува.

### **ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НА ЗНАЧЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ СДУВАЕМОСТИ**

Процесс сдува пыли является достаточно сложным и зависит как от свойств материала, так и от аэродинамической модели трубы, так и от времени проведения эксперимента. Особенность в том, что в начале эксперимента пыль сдувается гораздо более интенсивно, чем спустя некоторое время, что значительно затрудняет понимание и практическое применение полученных данных. Похоже, что путаница начинается с того момента, когда в Новороссийской методике было введено понятие «максимального удельного сдува», но не было дано ни определения этого термина, ни процедуры, которая бы исчерпывающе объясняла, что подразумевается. Построим график зависимости коэффициента сдува  $q$  от времени проведения эксперимента на примере пыли песчано-гравийной смеси для скорости потока воздуха 5 м/с. Данный вид пыли приводится в Новороссийской методике, поэтому перепроверка данных и их сопоставление представляет собой интерес. Для скорости ветра 5 м/с и ПГС пыли в методике в таблице 9 приводится значение 0,71 г/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ), но непонятно, для какой продолжительности эксперимента. Была проведена серия экспериментов, в которой изменялось время воздействия на образец ветровой нагрузки; затем по формуле (1) вычислялся коэффициент сдува  $q$ , результат представлен на рисунке 4. Из рисунка 4 следует, что коэффициент  $q$  только при этой скорости и для данной пыли может изменяться от 0,4 до 1 г/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ). Причиной снижения сдуваемости пыли является слеживаемость или так называемая «упаковка» пыли. Если посмотреть на образец после того, как он был подвергнут сдуву, то станет видно, что он уплотнился; при этом трение и сцепление между мелкими частицами возросло.

Как упомянуто раньше, в Новороссийской методике для расчета приводятся характеристики «максимального удельного сдува», что хорошо согласуется с данными на рисунке 4. Очень похоже, что составители Новороссийской методики действительно определяли самую большую, то есть максимальную сдуваемость пыли. Из нашего опыта и для нашей установки ей соответствует сдув, который наблюдается в течение первых трех минут после начала эксперимента. Затем сдув существенно замедляется и происходит более равномерно, но такие параметры уже гораздо меньше,

чем представленные в расчетной Новороссийской методике. Аналогичная форма графика на рисунке 4 была ранее описана во временных методических указаниях по расчету выбросов пыли в атмосферу при складировании сыпучих материалов [17].

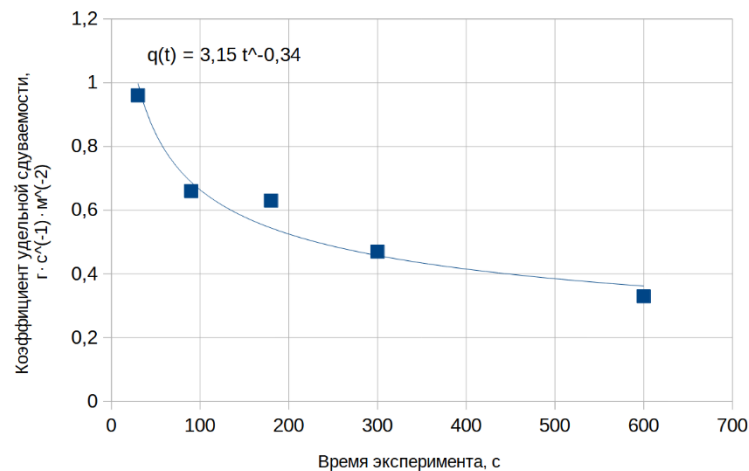


Рис.4. Снижение коэффициента сдуваемости с течением времени

Дадим определения, которые не будут противоречить уже устоявшейся и широко применяемой расчетной методике и в то же время будут объяснять снижение коэффициента сдува  $q$ , указанное на рисунке 4.

Удельная сдуваемость — масса пыли, уносимая под действием ветра с единицы пылящей поверхности в единицу времени.

Максимальная удельная сдуваемость — то же, что удельная сдуваемость, но во временном интервале от начала эксперимента до момента, когда унос пыли становится равномерным.

Стабилизированная удельная сдуваемость — то же, что удельная сдуваемость, но в случае, когда повторение эксперимента несколько раз подряд для одной и той же навески пыли в течение продолжительного времени приводит к получению схожего коэффициента сдува  $q$ .

Логика, которая стоит за приведенными определениями, во-первых, согласуется с реальными значениями, приведенными в используемых методиках, так как они похожи на значения, приводимые с запасом. И также согласуется с рисунком 4, из которого следует, что при продолжительном воздействии на образец потока воздуха удельная сдуваемость будет равномерной с погрешностью на истончение слоя навески, но гораздо ниже, чем в первые 3 минуты после начала эксперимента. Отметим, что, помещая образцы в одинаковые условия, мы можем определить, чем отличается сдуваемость разных образцов, даже если эксперимент зависит от времени воздействия потоком воздуха в секундах.

### ЗАВИСИМОСТЬ СДУВАЕМОСТИ ОТ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПЫЛЯЩЕГО МАТЕРИАЛА

Была проведена серия экспериментов для определения удельной сдуваемости разных видов гипса с предприятия по изготовлению строительных материалов. Аналогичная работа была ранее выполнена нами в исследовании [18]. Истинная плотность определялась пикнометрическим методом [19-20] и для всех образцов находилась в диапазоне 2,5—2,7 г/см<sup>3</sup>. Из-за одинаковой плотности можно сделать допущение, что удельная сдуваемость будет зависеть в основном от дисперсного состава пыли. Наша гипотеза звучит так: чем больше доля частиц менее 30 мкм, тем меньше будет сдуваемость, и чем больше доля крупных частиц, тем больше будет сдуваемость. При определении дисперсного состава пыли применялась находящаяся в разработке программа SPOTEXPLORER FA, которая является модификацией известной и широко применяемой программы SPOTEXPLORER [21]. Отличие новой версии состоит в том, что данные нескольких фотографий можно объединить в один график, что удобно, потому что большая выборка позволяет как уточнить данные, так и сравнить полученные результаты на одном рисунке. Используя от 6 фотографий микроскопии для каждого образца гипсовой пыли, были получены интегральные кривые распределения масс частиц по диаметрам, представленные на рисунке 5.

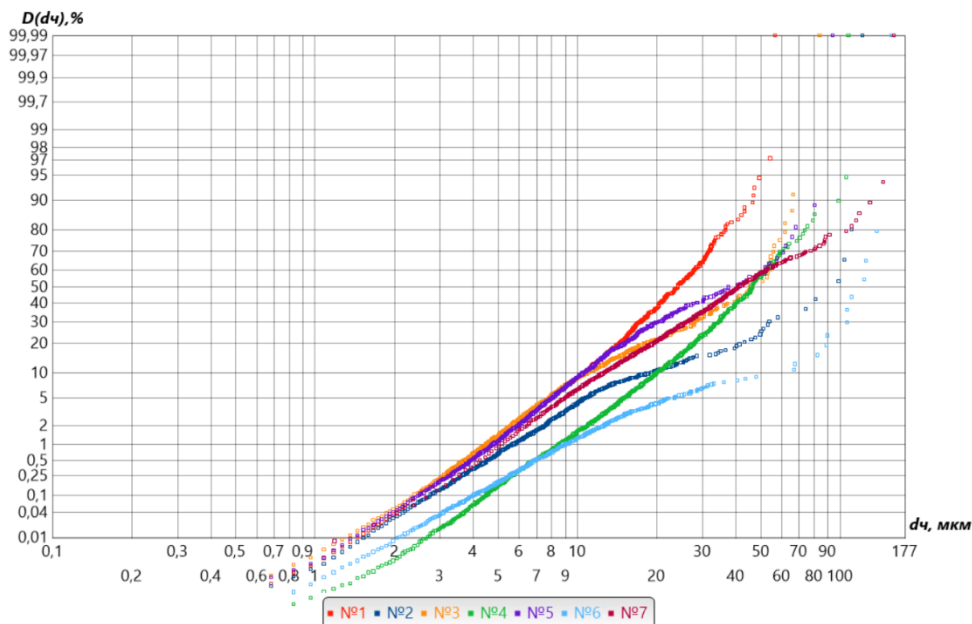


Рис. 5. Интегральные функции распределения масс частиц по диаметрам для исследованных гипсовых образцов

Далее были выполнены испытания по определению максимальной удельной сдуваемости семи образцов пыли. В таблице 1 приводятся номера исследуемых видов гипса, эмпирически полученная формула и основные значения функции прохода, полученные из рисунка 5. В таблице 2 приводятся значения сдуваемости при скорости потока воздуха 5 м/с, которые отсортированы в порядке убывания значений PM<sub>10</sub>. Аналогичный метод анализа данных дисперсного состава приводится в исследовании [22]. Вид функций, приведенных на рисунке 5, называется усеченным нормальным распределением. Прямые участки в логарифмически-вероятностной сетке координат доказывают справедливость для пыли закона логарифмически-нормального распределения на данном интервале [23].

Таблица 1.

Эмпирически полученные зависимости удельной сдуваемости от скорости потока воздуха для каждого образца гипса и основные значения анализа дисперсного состава

№ Гипса	Максимальная удельная сдуваемость	D5, D50, D95-
№1	$0.033 v^{1.886}$	7, 22, 44
№2	$0.016 v^{3.088}$	11, 92, 116
№3	$0.018 v^{2.040}$	7, 50, 64
№4	$0.010 v^{3.613}$	14, 48, 87
№5	$0.001 v^{3.997}$	8, 40, 79
№6	$0.026 v^{3.444}$	24, 110, 147
№7	$0.002 v^{4.624}$	9, 40, 125

Таблица 2.

Вычисленные для скорости 5 м/с значения удельной сдуваемости для каждого образца гипса и доля пыли PM<sub>10</sub>

№ Гипса	V = 5 м/с, q	PM <sub>10</sub> , %
№1	0.68	8.7
№5	0.62	8.7
№3	0.47	8.5
№7	3.41	6.2
№2	2.30	4.1
№4	3.34	1.5
№6	6.64	1.2

Из таблицы 2 видна закономерность, что при снижении доли  $PM_{10}$  коэффициент сдуваемости возрастает, кроме случая с пылью №7, для которой значение  $PM_{10}$  является средним в выборке, но также у нее довольно высокая доля частиц более 120 мкм в эквивалентном диаметре. Данная пыль сдувалась крупными комками, что не противоречит упомянутой ранее догадке об упаковке частиц, но отделяются они достаточно легко, что потенциально объясняют крупные частицы в данной выборке. На рисунке 6 графически представлены все степенные уравнения регрессии, которые приведены в таблице 1.

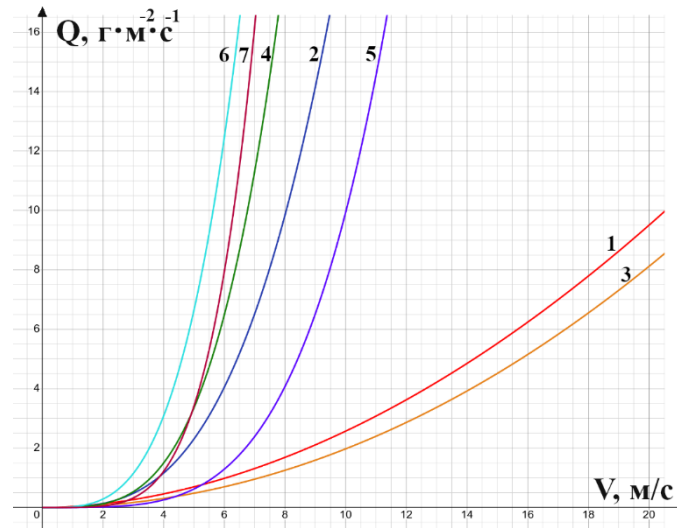


Рис. 6. Зависимость удельной сдуваемости от скорости потока воздуха для исследованных образцов гипса.

### ВЫВОДЫ

1. Была разработана методология по определению параметров максимальной удельной сдуваемости разных видов порошковых материалов и пыли, которая представляется в данной работе. Применяется лабораторное сито, весы, радиальный вентилятор и ДМЦ-01 для определения удельных характеристик пыления.

2. Были проведены испытания сдува для разных видов гипсовой пыли, и определены закономерности зависимости сдува от дисперсного состава пыли. Мы предполагаем, что частицы менее 30 мкм понижают сдуваемость, а частицы более 150 мкм её увеличивают.

3. Определялся коэффициент сдуваемости в зависимости от продолжительности эксперимента. Предлагается разделить понятие удельной сдуваемости на максимальную и стабилизированную, где стабилизированная сдуваемость предполагает воспроизводимость схожего значения в течение длительного времени, а максимальная сдуваемость охватывает период эксперимента до момента стабилизации уноса пыли.

4. Помещая образцы в одинаковые условия, мы можем определить отличия сдуваемости разных образцов, даже если эксперимент зависит большого количества факторов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Методическое пособие по расчету выбросов от неорганизованных источников в промышленности строительных материалов. – Новороссийск: ЗАО «НИПИОТСТРОМ», 2000. – 28 с.

2. Чулаков, П.Ч. Теория и практика обеспыливания атмосферы карьеров / П.Ч. Чулаков. – М.: Недра, 1973. – 160 с.

3. Методика расчетной оценки ветровой эрозии и пыления золоотвала ТЭС. РД 153-34.0 02.106-98. – Екатеринбург: ОАО «УралОРГРЭС», 1998. – 28 с.

4. Методика расчета вредных выбросов (сбросов) для комплекса оборудования открытых горных работ (на основе удельных показателей). – Люберцы: ННЦ ГП-ИГД им. А.А. Скочинского, 1999. – 47 с.

5. Бегунов, А. А. Пылеподавление на угольных предприятиях / А. А. Бегунов // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2020. – № 2. – С. 75-

78. – DOI 10.25558/VOSTNIK.2020.70.35.009. – EDN CPNVSG.
6. Фукс, Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 351 с.
7. Медведев, И.И. Аэрология калийных рудников / И.И. Медведев, А.Е. Красноштейн. – Свердловск: АН СССР, 1990. – 250 с.
8. Бухаров, И.И. Исследование запыленности воздуха и разработка основных мероприятий по борьбе с пылью на Верхнекамских калийных рудниках [Текст] : Автореферат дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук / И.И. Бухаров. – Новочеркас. политехн. ин-т им. С. Орджоникидзе. - Новочеркасск : [б. и.], 1967. - 19 с.
9. Дюсебаев, М. К. К40 КИМ НХ Аэрология карьеров. Учеб. пособие / К.М. Дюсебаев, А.К. Кенжебаев. – Алматы. – 2004.
10. Комонов, С. В. Экспериментальное исследование процесса пыления поверхности намывного пляжа золошлакоотвала / С. В. Комонов, Д. А. Озерский // Гео-Сибирь. – 2005. – Т. 5. – С. 184-189. – EDN PUYJNX.
11. Jin, H. Development of environmental friendly dust suppressant based on the modification of soybean protein isolate / H. Jin et al. //Processes. – 2019. – Т. 7. – №. 3. – С. 165.
12. Патент № 2748144 С1 Российская Федерация, МПК В01Д 45/00. Аэродинамическая труба для исследования пылящих поверхностей : № 2020134997 : заявл. 26.10.2020 : опубл. 19.05.2021 / А. В. Иванов, Ю. Д. Смирнов, С. А. Чупин ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – EDN FHCMSB.
13. Аэродинамическая труба: Патент № 2526515 С1 Российская Федерация, МПК G01М 9/02/ Батура Н. И., Верейский Г. С., Головкин В. А. [и др.] ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского" (ФГУП "ЦАГИ"). – № 2013115079/28; заявл. 04.04.2013 : опубл. 20.08.2014. – EDN ZFQWWL.
14. Анализ влияния геометрических размеров выхлопной трубы циклона на степень его очистки с помощью компьютерного моделирования / И. И. Чемезов, Г. Е. Леченко, К. Р. Волков [и др.] // Вестник евразийской науки. – 2020. – Т. 12, № 4. – С. 20. – EDN ХНТТФJ.
15. Maćkowiak, A. Investigation into the Flow of Gas-Solids during Dry Dust Collectors Exploitation, as Applied in Domestic Energy Facilities–Numerical Analyses / A. Maćkowiak et al. // Eksploatacja i Niezawodność. – 2023. – Т. 25. – №. 4.
16. Aboezez, A. Comprehensive design and performance validation of a wind tunnel for advanced respirable dust deposition investigations / A. Aboezez et al. //Journal of Hazardous Materials. – 2024. – Т. 478. – С. 135516.
17. Жаберов, С.В. Временные методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ /пыли/ в атмосферу при складировании и перегрузке сыпучих материалов на предприятиях речного флота. Методические указания. – Белгород : изд.БТИСМ, 1992. – 35с.
18. Особенности сдувания пыли различной дисперсности / В. С. Симаков, Д. П. Боровков, В.А. Багров, В. Н. Азаров // Экономика строительства и природопользования. – 2024. – № 4(93). – С. 5-10. – EDN АКВРWU.
19. Коузов, П. А. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей / П.А. Коузов, Л. Я. Скрябина. – Л.: Химия, 1983. – 143 с, ил.
20. Asamatdinov, M. O. et al. Stabilized clay-gypsum binder / М.О. Asamatdinov //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2023. – Т. 410. – С. 01014.
21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019617903 Российская Федерация. SPOTEXPLORER 2018 : № 2019616798 : заявл. 05.06.2019 : опубл. 24.06.2019 / В. Н. Азаров, А. Б. Стреляева, Д. Р. Добринский [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ). – EDN QXMOMZ.
22. Анализ характеристик пыли природного происхождения Нижнего Поволжья / А.С. Гаспарян, В. Н. Азаров, И. С. Кленин, М. Д. Азарова // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 9(93). – С. 200-207. – EDN GTVQMP.
23. Исследование дисперсного состава пыли городской среды / В. Н. Азаров, А. А. Кузьмичев, Д. А. Николенко [и др.] // Вестник МГСУ. – 2020. – Т. 15, № 3. – С. 432-442. – DOI 10.22227/1997-0935.2020.3.432-442. – EDN WFOWLГ.

## METHODOLOGY FOR DETERMINING THE SPECIFIC BLOWABILITY OF DUST FROM BULK MATERIALS

<sup>1</sup>Simakov V.S., <sup>2</sup>Shevtsov E.I., <sup>3</sup>Sandula T.A., <sup>4</sup>Baibusinova O.R.,  
<sup>5</sup>Postnikova E.A., <sup>6</sup>Sergina N.M.

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

**Annotation.** Abstract. Conducting tests to determine the specific blowability of dusty materials is a pressing task due to the long-standing need to refine and expand the methodological guidelines used to calculate dust emissions from unorganized sources. The dusting process is accompanied by the long-distance transport of fine solid dust particles PM10 and PM2.5, which are recognized by the WHO as hazardous pollutants. However, the procedure for determining the characteristics of specific and maximum specific blow-off is presented in a fragmentary manner in the literature. The equipment used is described superficially, or only tables with the obtained data are provided. The purpose of this article is to summarize the experience presented in the literature and our practical experience: we present an aerodynamic model of the pipe, a physical model of dust entrainment, theoretical assumptions, a comparison of our data with data from the Novorossiysk methodology, and an experiment showing the influence of the dispersion composition on the characteristics of dust blowout.

**Keywords:** specific dust blowout characteristics, PM10, PM2.5, wind tunnel, sand-gravel mixture, gypsum, blowout velocity.