

## Исследование распространения частиц мелкодисперсной пыли в рабочей зоне строительных процессов

*С.Е. Манжилевская*

*Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В данной статье рассматривается исследование характеристик частиц мелкодисперсной пыли выделяемых на строительной площадке при производстве работ с использованием в расчетах логнормального распределения. Частицы мелкодисперсной пыли, меньше 10 мкм, представляют наибольший риск при вдыхании, так как они могут проникать в легкие. Исследование гранулированного состава пыли выделяемой в воздухе рабочей зоны приближенно выражается функцией кривой нормального распределения, когда диаметр частиц рассчитывается логарифмически. Представленные расчеты в статье позволяют определить распределение пыли по территории строительной площадки и выявить соответственно границы санитарно-защитной зоны (СЗЗ), когда значение запыления на границе ее будут соответствовать предельно допустимым выбросам (ПДВ).

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, мелкодисперсная пыль, оседание пыли, пылеподавление, экология в строительстве, пылеуловители, строительные работы, защита атмосферного воздуха, охрана труда в строительстве, пылевое загрязнение.

В исследовании вопросов борьбы с пылевыделением на строительном производстве не подвергается сомнению пагубность воздействия пыли на здоровье человека, что может проявить себя в таких заболеваниях, как астма, силикоз, пневмокониоз, что являются смертельными заболеваниями. Нет необходимости подвергать сомнению необходимость очистки воздуха рабочей зоны при выполнении пылящих строительных процессов.

С развитием техники и технологии в строительном производстве все больше и больше появляется пылящих процессов, что в свою очередь увеличивает список заболеваний рабочего-строителя. Большинство болезней связанных с пылью, вызваны вдыханием загрязненного воздуха, но такие заболевания как рак и дерматит могут быть вызваны за счет контакта кожи рабочего с пылевым загрязнением.

В настоящее время очистка воздуха и предотвращение распространения пылевого загрязнения за пределы рабочей зоны и

санитарно-защитной зоны в целом является одним из важнейших аспектов сферы экологической безопасности и охраны труда в строительстве. Защита населения и непосредственных исполнителей строительных процессов от вредных выбросов определена и решается на законодательном уровне. В строительном производстве имеются ряд проблем и необходимо приложить усилия по улучшению условий труда рабочих-строителей и снизить уровень опасности, которым подвергается население, проживающее около источника выделения пыли в целом [1, 2].

В дополнение к моральному обязательству предотвращать ущерб здоровью работнику, а также юридическим ограничениям в отношении загрязнения воздуха строительная отрасль должна также принимать меры предосторожности, предупреждения выбросов и пагубного воздействия, преследуя собственные интересы, или она может столкнуться с серьезными требованиями о компенсации, когда заказчиков и застройщиков обязать выплачивать штрафы и дотации за профессиональные болезни, смерть работников или ущерб экологии и населению причиняемый от расположенной по соседству строительной площадке [3, 4].

Тем не менее, не всегда возможно очистить воздух от всех загрязняющих веществ, за исключением непомерно высоких затрат, так что необходимо принять определенную степень загрязнения. Строительные площадки, на которых выполняются как строительные работы по возведению объектов, так и работы по реконструкции должны быть оснащены и оборудованы защитными технологиями, которые ограничат радиус рассеивания частиц пыли за пределы площадки, так и снизят загрязнение в самой рабочей зоне.

Частицы мелкодисперсной пыли, меньше 10 мкм, представляют наибольший риск при вдыхании, так как они могут проникать в легкие.

Частицы мелкодисперсной пыли – это мелкие, твердые частицы, образующиеся при разрушении вещества или эрозии поверхности. Диапазон размеров частиц может расширяться по нижним предела за пределом видимости с помощью оптического микроскопа ( $< 0,2$  мкм) и по верхним пределам до размеров частиц способных уже оседать в воздухе, чаще всего до 10мкм. Частицы пыли обычно неправильной формы, разных размеров (полидисперсные) и часто в агрегатном состоянии представлены на рисунке 1 [5, 6].



Рис. 1 - Частицы строительной пыли в жилом помещении дома расположенном в 110 м от строительной площадки.

В состав мелкодисперсной пыли также входят твердые частицы, образующиеся при затвердевании расплавленных капель или испарение вещества из капель раствора, например бетона. В таких случаях частицы будут более регулярными по сферической или кристаллической форме.

---

Многие строительные процессы, связанные с монтажными и отделочными работами при выполнении выделяют частицы достаточно мелкой пыли, например замес раствора с цементом или шлифовка отштукатуренной поверхности [7, 8].

Даже если хрупкие материалы (бетон, кирпич) измельчаются с целью получения больших элементов, порция пылезагрязнения образуется всегда. Все абразивные процессы, будь то преднамеренное шлифование станком или выполнение стандартных технологических процессов, производят частицы пыли. Износ одежды также может быть важным источником пыли.

Фракционный состав мелкодисперсной пыли, образующейся при дроблении или измельчении хрупких материалов, в основном постоянен.

Для определения данного состава были разработаны различные эмпирические функции. Одной из широко используемых функций распределения частиц по размерам является уравнение Розина-Раммлера [9],

$$R_M = \exp(-bd_p^n), \quad (1)$$

где  $R_M$  – частица вещества размером более  $d_p$  (остаток материала на фильтре вещества  $d_p$ ),  $b$  и  $n$  – константы;  $n$  менее 1. График логарифмической зависимости  $(1/R_M)$  от  $d_p$  на модели дает прямую линию  $n$ . Эта функция первоначально использовалась для пылевидного угля, но было выявлено, что она применима к широкому ассортименту материалов.

Существует еще одно распространенное уравнение, на этот раз для массовой доли  $S_M = (1 - R_M)$ , меньшей, чем размер  $d_p$  – уравнение Годэна-Андреева [10],

$$S_M = ad_p^n. \quad (2)$$

Необходимо учесть, что уравнения (1) сводится к уравнению (2), когда  $n$  – это  $R_M$  или  $S_M$  – меньшее значение. Если уравнение выполняется, график логарифмической зависимости  $S_M$  от  $d_p$  на модели дает прямую линию  $n$ .

Во многих случаях, например, при разработке грунта в котловане, или демонтажных работах, для предотвращения образования большого объема загрязнения мелкодисперсной пыли при работе с материалом рабочим-строителям необходимо стремиться обойтись без дробления на мелкие фрагменты, так как данный процесс усиливает пылевыделение.

Для проведения фракционного анализа размера частиц пыли, выделяемых при выполнении таких работ как дробление, сверление, взрывных работ при демонтаже при работе с грунтом, штукатуркой, бетоном установлено, что размеры частиц мелкодисперсной пыли, распределенные по количеству конкретного материала не зависят от технологии производства процесса и выражены следующей функциональной зависимостью

$$\frac{dN}{dd_p} \propto d_p^{-\beta}, \quad (3)$$

где  $\frac{dN}{dd_p}$  – количество частиц, на единицу измерения размера приведенное к размеру  $d_p$  и  $\beta$  – коэффициент приведения к номинальному размеру частиц пыли. Для различных материалов, например как гипс  $\beta \approx 2,25$ ; для щебня  $\beta$  варьируется в пределах 2.7-3.4. Пыль от грунта с преобладанием песка может проявлять повышенную частоту частиц в диапазоне размеров природных кварцевых зерен - 50-500 мкм.

При ранее указанном утверждении, что масса частиц заданного размера пропорциональна  $Nd_p^3$ , в этом случае мы увидим, что зависимость (3) эквивалентна уравнению Годэна (2) если  $\beta = 4 - n$ . Для гипса (как и для

большинства минералов)  $n$  обычно меньше 1 при макроскопических размерах ( $\beta > 3$ ),  $n$  медленно увеличивается с уменьшением размера частиц (представляя отклонение от уравнения Годэна) примерно до 1,75 в микронном диапазоне, что соответствует  $\beta = 2,25$ .

При рассмотрении данных уравнений распределения частиц пыли видно, что образование частиц мелкодисперсной пыли в воздухе рабочей зоны избежать невозможно при работе с хрупкими материалами. В некоторой степени объем пылевого загрязнения мелкодисперсной пылью можно контролировать технологией процесса и оборудованием. Цель данных превентивных мер заключается в усилении сил растяжения при разрушении хрупкого материала, предотвращении увеличения радиуса распространения частиц пыли и неконтролируемого процесса вторичного разрушения.

Частицы мелкодисперсной пыли создают пагубные последствия, когда они рассеиваются в атмосфере и это не происходит спонтанно. Частицы сухой пыли в общей массе имеют слабую адгезию. Наличие в воздухе капель конденсированной воды значительно увеличивает адгезию частиц.

Исследование гранулированного состава пыли выделяемой в воздухе рабочей зоны приближенно выражается функцией кривой нормального распределения, когда диаметр частиц рассчитывается логарифмически. В таком "логарифмически нормальном" распределении фракции частиц пыли  $S$  меньше, чем значение  $d_p$  и имеет вид

$$S = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2\right] dx, \quad (4)$$

где  $x = \ln d_p, \bar{x}$  - это медианное значение  $x$ , соответствующее  $S = 0.5$ , и  $\sigma$  – значение стандартного отклонения. Следует отметить, что  $S = 1$ , когда  $x = \infty$ .

Интересной особенностью логарифмически нормального распределения является то, что если расчетное количество частиц распределяется лог нормально, то площадь поверхности и объем или масса (в любой момент времени, когда рассматривается размер частицы) также будет, распределяется лог нормально с тем же стандартным отклонением, но по-разному рассчитывается средний логарифмический размер.

Таким образом, если  $S_N$  и  $\bar{x}_N$  относятся к распределению числа частиц, то частота частиц на логарифмической шкале равна

$$\frac{dN}{dx} = N \frac{dS_N}{dx} = \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x - \bar{x}_N}{\sigma} \right)^2 \right]$$

и для  $j$ -го момента,

$$\begin{aligned} d_p^j \frac{dN}{dx} &= \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ jx - \frac{1}{2} \left( \frac{x - \bar{x}_N}{\sigma} \right)^2 \right] = \exp \left( j\bar{x}_N + \right. \\ &\left. \frac{j^2\sigma^2}{2} \right) \frac{N}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{x - (\bar{x}_N + j\sigma^2)}{\sigma} \right\}^2 \right] \end{aligned}$$

Следовательно, накопительное распределение по размерам  $j$ -го момента имеет вид

$$S_j = \frac{\int_{x=-\infty}^x d_p^j dN}{\int_{x=-\infty}^{\infty} d_p^j dN} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp \left[ -\frac{1}{2} \left\{ \frac{x - (\bar{x}_N + j\sigma^2)}{\sigma} \right\}^2 \right] dx,$$

что соответствует уравнению (4) с медианным значением  $\bar{x}_l = \bar{x}_N + j\sigma^2$ .

Медианные логарифмические диаметры  $\bar{x}_S$  распределения площади поверхности и  $\bar{x}_M$  объема или распределение по массе достигается, получая  $j = 2$  и  $3$  соответственно:

$$\bar{x}_S = \bar{x}_N + 2\sigma^2; \bar{x}_M = \bar{x}_N + 3\sigma^2. \quad (5)$$

Если значение  $\sigma$  и любого  $\bar{x}$  известны, остальные значения могут быть легко найдены.

Распределения экспериментальных размеров, которые являются нормальными логарифмами, дают прямую линию при нанесении на график логарифмически нормального распределения, представленного на рисунке 2.

Ось  $y$  графика масштабируется в значениях

$$S = 0,5 + \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_0^y \exp\left(-\frac{1}{2}y^2\right) dy,$$

так что,  $S = 0,5$  при  $y = 0,0841$  при  $y = 1$  (0,159 при  $y = -1$ ); 0,977 при  $y = 2$  (0,023 при  $y = -2$ ) и т.д.

Ось  $x$  графика масштабируется в значениях  $d_p$ , в циклах по 10, так чтобы  $d_p = e^0$  или 1 при  $x = 0$ ;  $d_p = e$  или 2,718 при  $x = 1$ ;  $d_p = e^2$  или 7,39 при  $x = 2$ ; и т.д. Цикл из 10 значений занимает 2,303  $x$  единиц.

Общее число значений  $S_N$ , противопоставленное значениям  $d_p$  на графике, дает прямую линию наклона  $1/\sigma$  и обрезает линию  $y = 0$  ( $S = 0,5$ , или 50% на графике) при  $x = \bar{x}_N$ ; цена деления для значение  $d_p$  в этой точке представляет собой средний геометрический диаметр распределения. Поскольку линия наклона равна  $1/\sigma$ , длина ее проекции на оси  $x$  соответствует единице  $y$  расстояния ( $S = 0,5$  и 0,841), является  $\sigma$  (в  $x$ -единицах). Подобным образом значение длины  $2\sigma$  (или  $3\sigma$ ) может быть

получена на шкале  $x$ , принимая ось  $y$  – расстояние в качестве  $2$  (или  $3$ ), как показано на рисунке 2.

Кривые площади поверхности, объема или распределения массы представляют собой прямые линии, параллельные кривой числа, поскольку значение  $\sigma$  неизменно, но смещены от нее в направлении шкалы  $x$  на расстояния  $2\sigma^2$  и  $3\sigma^2$  согласно (5), или в направлении  $y$  на значения  $2\sigma$  и  $3\sigma$  ( $y$ -единицы).

Например, значение расстояния  $2\sigma$  можно получить по шкале  $x$ , как указано выше, и перенести на шкалу  $y$  по линии наклона с коэффициентом уклона 1:1 (рисунок 2), надо учесть различие масштабов между осями  $x$  и  $y$  и, следовательно, кривая распределения поверхности может быть нарисована.

Числовое значение  $\sigma$  может быть найдено с помощью отношения

$$\sigma = \ln \left\{ \frac{(d_p \text{ при } S = 84,1\%)}{(d_p \text{ при } S = 50\%)} \right\}.$$

На примере логарифмического распределения, представленного на рисунке 2, медиана распределения объема частиц определяется при размере частиц соответствующему  $S_N \cong 0,98$  (98%) на кривой распределения чисел. Поэтому ясно, что полученная кривая распределения объема (или массы) будет точной только в том случае, если «хвост» кривой распределение, представляющее разреженные крупные частицы, точно соответствует логарифмически нормальной функции.

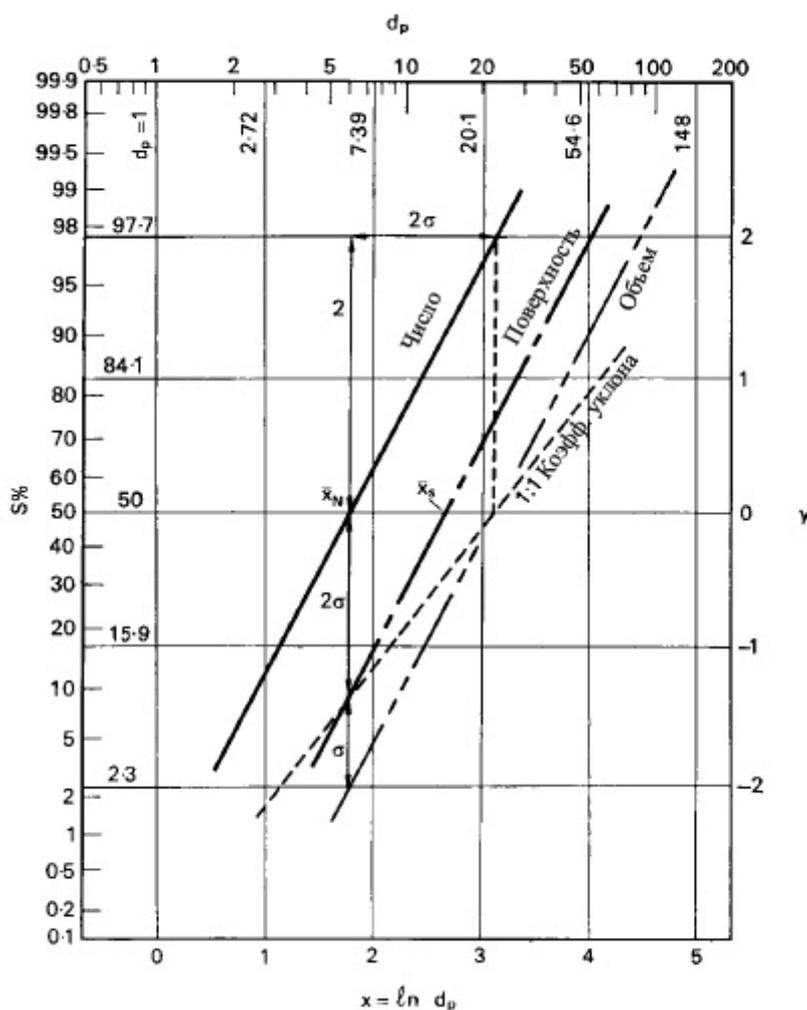


Рис. 2 – Логнормальное распределение частиц пыли по размерам, с иллюстрацией геометрической перестановки между кривыми числа, поверхности и объема.

Аналогичные соображения применимы при теоретическом преобразовании распределения массы в число.

Поэтому следует соблюдать осторожность при обработке экспериментальных данных о распределении по размерам.

Существует еще одно уравнение позволяющее проанализировать фракционный состав частиц выделяемых в воздушную среду – это экспоненциальная зависимость

$$\frac{dN}{dd_p} \propto \exp(-\beta d_p),$$

или в нормализованном виде,

$$\frac{dN}{dd_p} = \beta \exp\{\beta(1 - d_p)\}, \quad (6)$$

в этом случае  $\int dN$ , от  $d_p - 1$  до  $\infty$ , равно 1.

Для двухкомпонентных и однокомпонентных уравнения этого типа типичные значения  $\beta$  находятся в диапазоне от 0,3 до 1 мкм<sup>-1</sup>.

Многие уравнения, обычно содержащие экспоненциальные или степенные члены и с одним или двумя одноразовыми константами, будут соответствовать экспериментальным распределениям частиц по размерам, и нести первоочередный интерес в различных обстоятельствах. Они необходимы для того, чтобы лаконично составить краткое представление об экспериментальных данных по содержанию частиц пыли в воздухе рабочей зоны на строительном производстве и обеспечить основу для сравнения.

Представленные варианты уравнений позволяют, как сказано выше, определить распределение пыли по территории строительной площадки и выявить соответственно границы санитарно-защитной зоны (СЗЗ), когда значение запыления на границе ее будут соответствовать предельно допустимым выбросам (ПДВ). Только после этого необходимо решать вопрос уменьшения СЗЗ с использованием определенных технологических и организационных мероприятий для ее сокращения, соответственно будет уменьшаться и пылевыведение.

### Литература

1. Беспалов В.И., Котлярова Е.В., Бондаренко А.С. Научно методические основы обеспечения экологической безопасности территорий в



условиях урбанизации // Инженерный вестник Дона, 2019. № 1. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5553](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5553)

2. Азаров В.Н., Кошкарев С.А., Николенко М.А. Снижение выбросов систем обеспыливания с использованием дисперсного анализа пыли в стройиндустрии // Инженерный вестник Дона, 2015. № 1. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2838](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2838)

3. Желтобрюхов В.Ф., Ильинкова Ю.Н., Колодницкая Н.В., Осипов В.М. Способ обеспечения экологической и технической безопасности на объектах дорожного хозяйства // Инженерный вестник Дона, 2013. № 4. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2008](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2008)

4. Сергина Н.М., Семенова Е.А., Кисленко Т.А. Система обеспыливания для производства керамзита // Инженерный вестник Дона, 2013. № 4. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2013](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2013)

5. Ганичева Л.З. Анализ состояния атмосферного воздуха в промышленных городах Ростовской области // Инженерный вестник Дона, 2013. № 2. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1701](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1701)

6. Чебанова С.А., Азаров В.Н., Азаров А.В., Поляков В.Г. Влияние организационно-технологических решений строительства в стесненных условиях на окружающую среду // Инженерный вестник Дона, 2018. № 1. - URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4790](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4790)

7. Калюжина Е.А., Сахарова А.А., Козловцева Ю.И., Гвоздииков И.А., Кисленко Т.А., Килих Е.О., Боженкова А.С., Маркин В.С. Анализ неорганизованных пылевых выбросов в атмосфере города от электросталеплавильного цеха // Инженерный вестник Дона, 2018. № 2. - URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_121\\_Kalyuzhina\\_N.pdf\\_c4d92a4656.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_121_Kalyuzhina_N.pdf_c4d92a4656.pdf)

8. Калюжина, Е.А., Несветаев Г.В., Азаров В.Н. Исследования значений РМ<sub>10</sub> и РМ<sub>2,5</sub> в выбросах в атмосферу и рабочую зону при ремонтно-строительных работах // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.

---



Политематическая, 2012. №1 (20). – URL:  
vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=785

9. Hritonenko N. Mathematical Modeling in Economics, Ecology and the Environment. Springer Science & Business Media, 2014. 296 p.

10. Gillman M. An Introduction to Mathematical Models in Ecology and Evolution: Time and Space. John Wiley & Sons, 2009. 158 p.

### References

1. Bepalov V.I., Kotlyarova E.V., Bondarenko A.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5553

2. Azarov V.N., Koshkarev S.A., Nikolenko M.A. Inzhenernyj vestnik Dona 2015. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2838

3. Zheltobruhov V.F., Ilinkova U.N., Kolodnitskaya N.V., Osipov V.M. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2008

4. Sergina N.M., Semenova E.A., Kislenco T.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2013

5. Ganicheva L.Z. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1701

6. Chebanova S.A., Azarov V.N., Azarov A.V., Polyakov V.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4790

7. Kaluzhina E.A., Saharova A.A., Kozlovceva U.I., Gvozdikov I.A., Kislenco T.A., Kilich E.O., Bozhenkova A.S., Markin V.S. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018. № 2. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\_121\_Kalyuzhina\_N.pdf\_c4d92a4656.pdf

8. Kaluzhina E.A., Nesvetaev G.V., Azarov V.N. Internet-vestnik VolgGASU, 2012. № 1. URL: vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=785

9. Hritonenko N. Mathematical Modeling in Economics, Ecology and the Environment. Springer Science & Business Media, 2014. 296 p.

10. Gillman M. An Introduction to Mathematical Models in Ecology and Evolution: Time and Space. John Wiley & Sons, 2009. 158 p.