

## Об определении дисперсного состава цементной пыли седиментационным методом при пофракционном оседании частиц с использованием средств обработки бинарных фотографий

*Р.А. Лясин<sup>1</sup>, В.В. Лупиногин<sup>1</sup>, А.И. Евтушенко<sup>2</sup>, С. В. Лукьяница<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>Волгоградский Государственный Технический Университет*

*<sup>2</sup>Донской государственной технической университет*

**Аннотация:** Метод седиментационного анализа основан на измерении скорости осаждения твёрдых частиц, находящихся во взвешенном состоянии в зависимости от их эквивалентного диаметра. Использование метода седиментации для дисперсных систем ограничивается их размером, так, микроскопические пылевые частицы имеют малую скорость осаждения, их анализ достаточно затруднён. Поэтому для высокодисперсных систем авторами предложен метод седиментационного анализа с использованием портативных камер, производящих запись процесса осаждения и разбивку его на кадры. Полученные изображения покадрово переводятся с помощью графического редактора в формат бинарных (черно-белые), который способен обработать программное обеспечение. Полученные экспериментальные данные представлены в виде таблиц и функции распределения.

**Ключевые слова:** седиментация, дисперсный состав, пыль, бинарная фотография, эквивалентный диаметр, цементная пыль, функция распределения.

Образование твёрдых частиц на предприятиях строительной индустрии является побочным продуктом следующих технологических операций: грохочения, дробления, пиления, транспортирования, высокотемпературной обработки и т.п. Под воздействием газоздушных потоков твёрдые частицы отрываются от опорной поверхности и переходят во взвешенное состояние, образуя то, что принято называть пылью. Пылевое загрязнение на производственных объектах является наиболее широко распространённым производственным фактором, который способен оказывать влияние на работников и окружающую среду [1-3].

Время нахождения твёрдых частиц во взвешенном состоянии напрямую зависит от их эквивалентного диаметра, коэффициента динамической формы. Так, частицы пыли, особенно мелкодисперсные способны находиться длительное время в воздухе и легко попадать в

---

организм человека через биологические барьеры, вызывая стойкие отклонения со стороны сердечно-сосудистой, дыхательной, зрительной систем. Пылевые частицы, образующиеся при технологических процессах, представляют собой обломки неправильной формы. Неправильность формы оказывает влияние на траекторию её движения, тем самым изменяется седиментационная скорость. При использовании седиментрического метода анализа дисперсных систем предполагается, что в процессе гравитационного оседания твёрдые частицы не взаимодействуют между собой и имеют шарообразную форму [4-6].

На практике твёрдые частицы ввиду полидисперсности исходных материалов способны оказывать влияние друг на друга, так, пылевые частицы малого размера прилипают к поверхности более крупных частиц, и осаждаются вместе с ними [7].

Цель работы – определить дисперсный состав строительной пыли методом седиментации с использованием средств обработки бинарных фотографий.

1. Определить коэффициент пересчёта пикселей в реальные единицы измерения для различных значений фокусного расстояния портативных камер.
2. Построить интегральную функцию пофракционного распределения частиц по диаметрам в зависимости от временного промежутка оседания.
3. Определить время нахождения частиц эквивалентного диаметра  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  (англ. *Particulate Matter*, сокращ. *PM*) во взвешенном состоянии до их полного осаждения.

Для проведения исследования использовался цемент, который является составным компонентом элементов бетонной конструкции, изделий строительной химии, штукатурки и т.п.

Седиментационное исследование осуществлялось с помощью установки рис.1 предложенной авторами в работах [8-10], основной которой являлось седиментационное устройство [11]. Установка представляет собой седиментационный цилиндр, высотой 2000 мм, и подвижность воздуха в нем исключена. В верхней части седиментационного цилиндра располагается система распыления пыли 5, состоящая из воздушного поршня и предметного столика. Твёрдые частицы под действием воздушного потока переводятся во взвешенное состояние, постепенно оседая в седиментационном цилиндре 3. Оседают твёрдые частицы в седиментационном цилиндре с разной скоростью, постепенно приземляясь на поверхность стекла 2, располагающегося в основании установки 1. Для записи процесса седиментационного осаждения используется портативная камера 6 с возможностью вывода изображения в реальном времени на экран 7. Для определения начала седиментационного эксперимента в верхней части установки расположен датчик сброса 4, который запускает процесс записи портативной камерой. Для лучшего различения твёрдых частиц, на боковой поверхности стекла 2 размещается светодиодная лента.

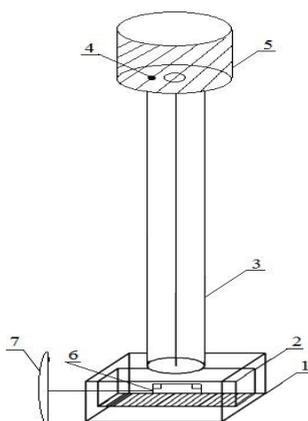


Рис. 1. - Седиментационная установка с системой видеофиксации:  
1 - металлическое основание; 2 - выдвижное стекло; 3 - седиментационный цилиндр; 4 - датчик сброса; 5 - распылитель пыли; 6 - портативная видеокамера; 7 - экран.

Полученная запись седиментационного осаждения твёрдых частиц с помощью графических редакторов семейства *Adobe* делится на кадры и переводится из растрового формата в бинарный (чёрно-белый).

Обработка полученных бинарных изображений осуществляется программой «*Spotexplorer*» в соответствии с (ГОСТ Р 56929-2016 Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Исследование фракционного состава пыли оптическим методом при нормировании качества атмосферного воздуха).

По микрофотографии пылевых частиц программа рассчитывает количество частиц, пиксельную площадь, проектированный диаметр. Для перевода полученных экспериментальных данных в реальные единицы, используют коэффициент пересчёта, который, в зависимости от фокусного расстояния портативной камеры, может изменять свои значения. Результаты анализа оформляются в виде интегральной функции распределения массы пыли по эквивалентным диаметрам, которые наносятся на вероятностно-логарифмическую сетку [12].

### **Результаты экспериментального исследования и их обсуждение**

Для проведения исследования дисперсного состава седиментационным методом, первоначально необходимо определить коэффициент пересчёта пикселей в микрометры. Осуществляется это путем съёмки референтного образца диаметром 60 мкм с помощью портативной камеры и обработки полученных кадров программой «*Spotexplorer*».

Для перевода полученных значений пиксельной площади частицы в эквивалентный микрометрический диаметр используют формулу (1):

$$d_{\text{эке}} = 2 \sqrt{\frac{S \times k_{\text{Д}}}{\pi}} \quad (1)$$

где:  $S$  – площадь проекции частицы,  $\text{pix}^2$ ;  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр частиц, мкм;  $k_{\text{п}}$  – коэффициент пересчёта пикселей в реальные единицы измерения.

В зависимости от значений фокусного расстояния, коэффициент пересчёта принимает значения, приведённые в таблице 1.

Таблица №1

Коэффициент пересчёта пикселей в реальные единицы измерения

Увеличение, кратность	Площадь референтного образца, мкм <sup>2</sup>	Полученное значение площади референтного образца в $\text{pix}^2$	Коэффициент пересчёта
X2,1	2826	4235	0,667
X2,3	2826	5639	0,501
X2,5	2826	7143	0,396

Для проведения эксперимента использовалась навеска пыли массой 1 г, которая с помощью устройства распыления (воздушного поршня) переводилась во взвешенное состояние. Твёрдые частицы, попадая в седиментационный цилиндр, постепенно осаждались под действием сил тяжести. Сначала выпадают наиболее крупные частицы, проходя за время  $\tau$  полную высоту седиментационного цилиндра  $H$ , а частицы меньшего диаметра остаются во взвешенном состоянии продолжительное количество времени, имея достаточно малые скорости осаждения.

Весь процесс седиментационного осаждения записывался с помощью портативной камеры расположенной в нижней части установки. Полученная видеозапись с помощью графического редактора *Adobe Premiere Pro* с максимальной частотой 30 кадров в секунду делится на растровые кадры. Растровая фотография для более точной обработки переводится в бинарный формат с помощью программного обеспечения *Adobe Photoshop*. Полученные результаты имеют следующие данные: номер пятна, площадь частицы, эквивалентный диаметр частицы, количество частиц меньше эквивалентного

диаметра, процент частиц от всего числа, максимальная и минимальная длина частицы.

Полученные обработанные экспериментальные данные представлены на рис.2 в виде интегральных функций распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке. Функции пофракционного оседания представлены для промежутков в 3 с. Для построения функции учитывались пылевые частицы, осевшие во временных промежутках измерения, без учёта предшествующего.

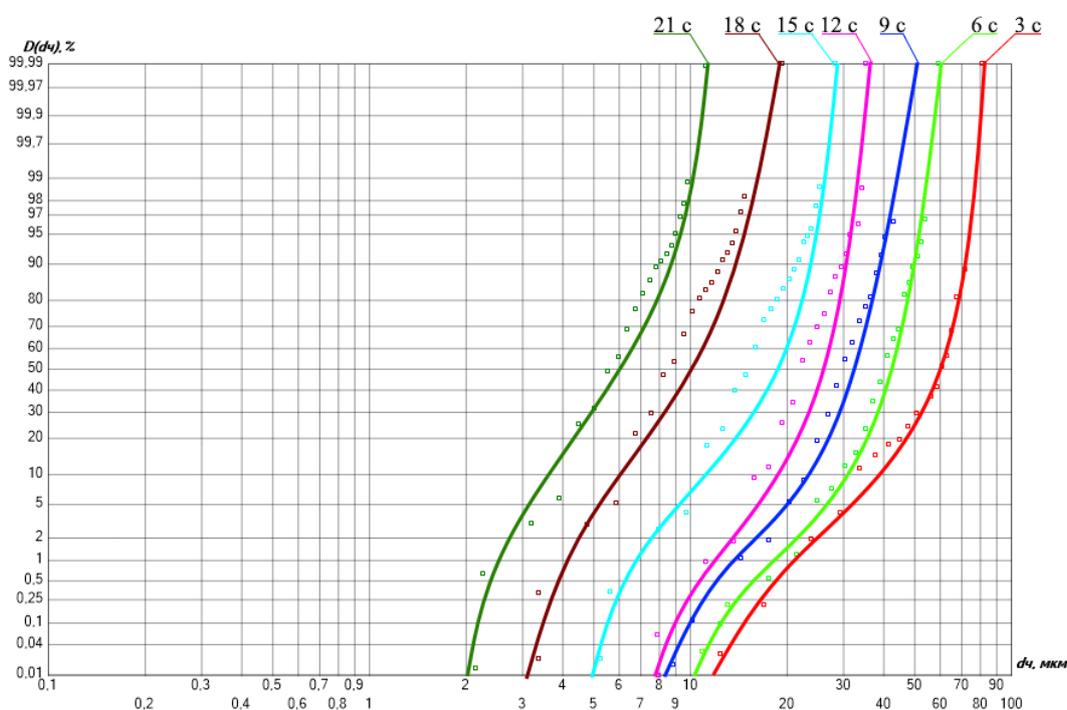


Рис. 2. - Интегральные функции пофракционного распределения массы частиц по эквивалентным диаметрам в зависимости от временного промежутка оседания

Анализируя интегральные функции пофракционного осаждения и полученные данные для их построения, определим массовое и количественное распределение частиц по эквивалентным диаметрам для временных промежутков. Полученные результаты для большей наглядности представлены в таблице 2.

Таблица №2

Массовое и количественное распределение частиц по эквивалентным диаметрам при пофракционной седиментации

Временной промежуток, с	Эквивалентный диаметр, мкм									
	<2,5	2,5-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	>80
Массовое пофракционное распределение, %										
0-3 с	-	-	0,995	3,715	6,94	14,01	21,89	35,85	15,92	0,68
3-6 с	-	-	1,75	7,37	27,43	53,45	10	-	-	-
6-9 с	-	0,11	4,83	24,35	64,27	6,55	-	-	-	-
9-12 с	-	0,32	15,53	71,45	12,7	-	-	-	-	-
12-15с	-	7,81	53,44	38,75	-	-	-	-	-	-
15-18 с	-	51,3	48,7	-	-	-	-	-	-	-
18-21 с	0,98	98,75	0,3	-	-	-	-	-	-	-
Количественное распределение, шт										
0-3 с	-	-	1	4	7	11	21	33	13	3
3-6 с	-	-	3	6	19	34	12	-	-	-
6-9 с	-	1	5	17	39	3	-	-	-	-
9-12 с	-	3	8	43	7	-	-	-	-	-
12-15 с	-	5	27	16	-	-	-	-	-	-
15-18 с	-	31	22	-	-	-	-	-	-	-
18-21 с	3	43	2	-	-	-	-	-	-	-

Анализируя полученные данные, можно наблюдать закономерное уменьшение эквивалентного диаметра осаждающихся твёрдых частиц на протяжении всего времени эксперимента. Несмотря на эту закономерность, с первых секунд исследования в осевшей пылевой навеске наблюдались частицы малого диаметра. Объясняется это аутогезионной слипаемостью малых и больших твёрдых частиц с последующим их разделением на поверхности стекла при седиментационном осаждении. Оценивая результаты проведенного исследования, можно прийти к выводам:

1. Коэффициент пересчёта пикселей в реальные единицы измерения зависит от фокусного расстояния портативной камеры.

2. На скорость осаждения твердых пылевых частиц оказывает влияние эквивалентный диаметр, коэффициент динамической формы, аутогезионная способность.

3. При пофракционном осаждении твёрдых частиц с течением времени происходит уменьшение эквивалентного диаметра.

4. Рассматривая интегральные функции пофракционного распределения, было определено время нахождения частиц  $PM_{2,5}$  и  $PM_{10}$  в воздушной среде. Так, частицы размером менее 10 мкм, находились в взвешенном состоянии - 9 с, а частицы размером менее 2,5 мкм - 21 с.

### Литература

1. Коузов П. А., Скрябина Л. Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей / Ленинград: Химия, 1983. 143 с.

2. Лясин Р.А., Багров В.А., Брежнева Я.С., Сидельникова О.П. Анализ влияния пылевого фактора асфальтобетонного завода на атмосферный воздух // Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса». В. Волгоградский государственный технический университет, 2021. С. 339-346. URL: [elibrary.ru/download/elibrary\\_48014463\\_17319314.pdf](http://elibrary.ru/download/elibrary_48014463_17319314.pdf).

3. Hong, K.Y.; King, G.H.; Saraswat, A.; Henderson, S.B. Seasonal ambient particulate matter and population health outcomes among communities impacted by road dust in British Columbia, Canada. J. Air Waste Manag. Assoc. 2017, 67, pp. 986–999. URL: [doi.org/10.1080/10962247.2017.1315348](https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1315348).

4. Гасайниева А. Г., Гасайниева М. Г. О загрязнении атмосферы мелкодисперсной пылью и, о ее влиянии на здоровье // Инженерный вестник Дона, 2017. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4664](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4664).

---

5. Бурьянов И.А., Логачев К.И., Гольцов А.Б. Определение коэффициента динамической формы пылевых частиц, выделяющихся в зоне заточных станков // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2021. №3. С. 19-27. URL: [elibrary.ru/download/elibrary\\_46590042\\_38866250.pdf](http://elibrary.ru/download/elibrary_46590042_38866250.pdf).

6. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Ленинград: Химия, 1987. – 264 с.

7. Копейкина А.А., Тertiшников В.Н., Азаров В.Н., Грачева Н.В. Об исследовании аэродинамических характеристик пыли, выделяемой при фасовке химических веществ // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5488](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5488).

8. Лупиногин. В.В. Методика определения скорости оседания мелкодисперсных частиц пыли различных диапазонов складских помещений методом видеофиксации // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. №3. С. 142-148. URL: [vgasu.ru/upload/files/science/3-76\\_2019.pdf](http://vgasu.ru/upload/files/science/3-76_2019.pdf).

9. Azarov V. N., Dobrinskiy D.R., Lupinogin. V.V., Sakharova A.A. Determination methodology of the subsidence speed of small-dispersed particles of different ranges of storage facilities by visual recording // International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2019). Volume 126 (2019). URL: [doi.org/10.1051/e3sconf/201912600072](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600072).

10. Азаров В. Н., Добринский Д.Р., Сахарова А.А. Исследование скорости оседания кремниевой пыли методом VFB // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2020. №4. С. 127-138. URL: [vgasu.ru/upload/files/4-81-2020.pdf](http://vgasu.ru/upload/files/4-81-2020.pdf).

11. Медников Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. М. : Наука, 1981. 176 с.

12. Азаров В.Н., Ребров В.А., Козловцева Е.Ю., Азаров А.В., Добринский Д.Р., Тертишников И.В., Поляков И.В., Абухба Б.А. Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y20185/49769.

### References

1. Kouzov, P. A., Skryabina L. A. Metody opredeleniya fiziko-himicheskikh svoystv promyshlennykh pylej. [Methods for determining the physicochemical properties of industrial dusts]. Leningrad: Himiya, 1983. 143 p.

2. Lyasin R.A., Bagrov V.A., Brezhneva Ya.S., Sidel'nikova O.P. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya stroitel'nogo kompleksa». V. Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet, 2021. pp. 339-346. URL: elibrary.ru/download/elibrary\_48014463\_17319314.pdf.

3. Hong, K.Y.; King, G.H.; Saraswat, A.; Henderson, S.B. Air Waste Manag. Assoc. 2017, 67, pp. 986–999. URL: doi.org/10.1080/10962247.2017.1315348.

4. Gasaynieva A. G., Gasaynieva M. G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4664.

5. Bur'yanov I.A., Logachev K.I., Gol'tsov A.B. Zhilishchnoe khozyaystvo i kommunal'naya infrastruktura. 2021. №3. pp. 19-27. URL: elibrary.ru/download/elibrary\_46590042\_38866250.pdf.

6. Kouzov, P.A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pylej i izmel'chennykh materialov. [Fundamentals of analysis of the dispersed composition of industrial dust and crushed materials]. Leningrad: Himiya, 1987. 264 p.

7. Kopeykina A.A., Tertishnikov V.N., Azarov V.N., Gracheva N.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5488.

---



8. Lupinogin. V.V. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2019. №3. pp. 142-148. URL: [vgasu.ru/upload/files/science/3-76\\_2019.pdf](http://vgasu.ru/upload/files/science/3-76_2019.pdf).

9. Azarov V. N., Dobrinskiy D.R., Lupinogin. V.V., Sakharova A.A. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2019). Volume 126 (2019). URL: [doi.org/10.1051/e3sconf/201912600072](https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912600072).

10. Azarov V. N., Dobrinskiy D.R., Sakharova A.A. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2020. №4. pp. 127-138. URL: [vgasu.ru/upload/files/4-81-2020.pdf](http://vgasu.ru/upload/files/4-81-2020.pdf).

11. Mednikov E. P. Turbulentnyy perenos i osazhdenie aerorozley. [Turbulent transport and deposition of aerosols]. M.: Nauka, 1981. 176 p.

12. Azarov V.N., Rebrov V.A., Kozlovitseva E.Yu., Azarov A.V., Dobrinskiy D.R., Tertishnikov I.V., Polyakov I.V., Abukhba B.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y20185/49769](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y20185/49769).