

О совершенствовании алгоритма компьютерной программы анализа дисперсного состава пыли в воздушной среде

*В.Н. Азаров¹, В.А. Ребров¹, Е.Ю. Козловцева¹, А.В. Азаров¹,
Д.Р. Добринский¹, И.В. Тертишников¹, И.В. Поляков², Б.А. Абухба¹*

¹Волгоградский государственный технический университет

²ООО «ЕврохимВолгаКалий»

Аннотация: В статье описывается микроскопический метод определения дисперсного состава частиц, схема анализа дисперсного состава частиц различных материалов, рассмотрены основы алгоритмов, используемых в компьютерных программах по обработке дисперсного состава частиц и разработаны рекомендации по их усовершенствованию.

Ключевые слова: компьютерный анализ данных, методика, дисперсный состав, диаметр частиц, пыль, дисперсные материалы, экология.

Введение

В связи с развитием промышленности, техники и технологий возрастает количество загрязняющих веществ, находящихся в дисперсном состоянии. Данные загрязнители могут оказывать негативное воздействие на различные зоны (атмосферный воздух, воздух рабочей зоны).

Для оценки степени дисперсности выбросов в настоящий момент используются различные характеристики, например, наименьший и наибольший размер частиц, разность между наибольшим и наименьшим размерами, средний размер частиц, удельная поверхность и др. Однако наиболее полно дисперсность характеризуется дисперсным (гранулометрическим, зерновым) составом. [1] Дисперсность в значительной мере определяет свойства твердых взвешенных частиц (пыли) - при диспергировании вещества многократно увеличивается его суммарная поверхность, в результате чего повышается поверхностная энергия, что влечет за собой увеличение физической и химической активности.

Кроме физических и химических свойств, дисперсный состав определяет в значительной мере характер и условия распространения

твердых взвешенных частиц (пыли) в воздушной среде: мелкодисперсная пыль осаждается значительно медленнее.

Вопрос пылеулавливания, разработка и совершенствования пылеулавливающих аппаратов и систем, а также осуществление мероприятий по предотвращению выделения пыли и ее распространению, решается, главным образом, на основании определения дисперсного состава.

Дисперсный состав определяют лабораторными исследованиями с использованием различных методов, одним из которых является микроскопический метод. Метод широко используется для исследования формы, размеров частиц, их морфологии, изучения их строения и структуры.

Для анализа дисперсного состава частиц различных материалов существуют как полностью автоматизированные программы расчета, например, Little 2 [2], так и отдельные программные продукты Image Tool v. 300, Excel, Origin, Statistica, позволяющие в комплексе произвести оценку дисперсного состава [3].

В общем случае, задача определения дисперсного состава микроскопическим методом сводится к следующему алгоритму (рис. 1).

В настоящее время исследования с целью определения дисперсного состава проводятся с использованием микроскопа и видеоокуляра, позволяющем получать моментальные фотоснимки исследуемых образцов.

На этапе рассмотрения образцов под микроскопом увеличение микроскопа определяется увеличением используемого объектива. Наиболее распространены объективы с увеличением от 4X до 100X при этом, общее увеличение микроскопа в связке с видеоокуляром в видимой области спектра может составлять более 1000X (цифровое увеличение). Однако и микроскопический метод с использованием оптического микроскопа имеет свои недостатки: он позволяет измерять частицы сравнительно небольшого диапазона (в среднем от 0,2 до 100 мкм).

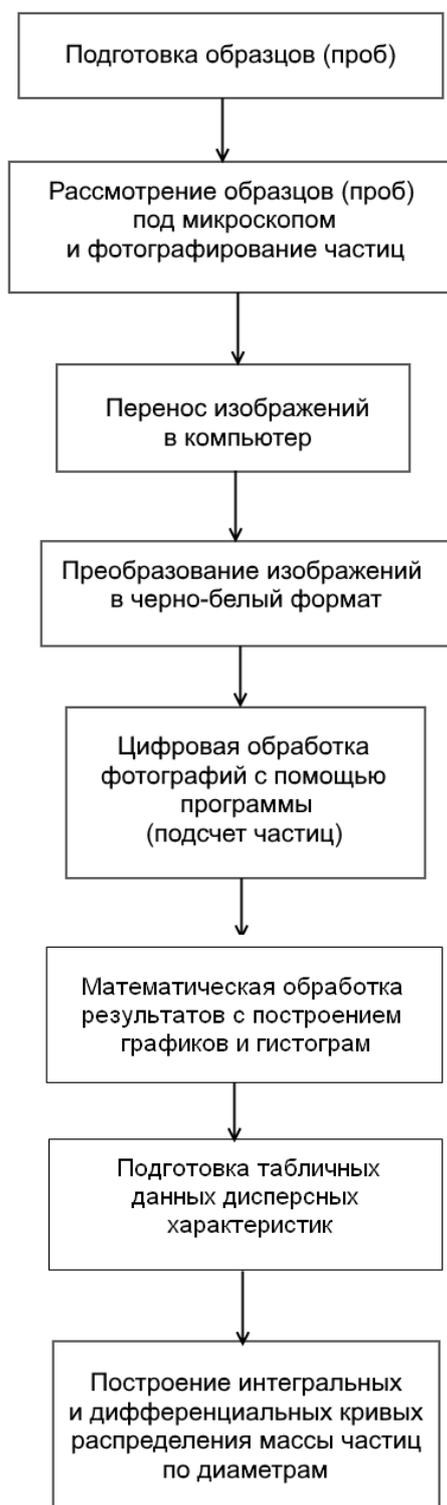


Рис. 1. Общий алгоритм определения дисперсного состава микроскопическим методом

Минимальные размеры частиц, которые можно наблюдать при белом свете для средней длины волны видимого диапазона ($\lambda = 550$ нм), составляют: для сухой системы 0,28 мкм, при водной иммерсии – 0,2 мкм и при масляной – 0,18 мкм. Разрешающую способность микроскопа можно также значительно повысить, применяя для освещения свет с более короткой длиной волны. Для этого используются светофильтры с различным спектральным пропусканием (зеленый $\lambda = 520$ нм, синий $\lambda = 455$ нм и др.). При использовании ультрафиолетового света можно добиться разрешающей способности до 0,1 мкм [3].

Поэтому для определения размера частиц меньше 0,1 мкм необходимо применение электронных микроскопов.

Твердые частицы пыли обычно имеют неправильную форму, свойственную обломкам твердых тел. Впрочем, кристаллическая природа вещества сказывается здесь: в некоторых пылях даже мельчайшие частицы сохраняют свойственную данному веществу пластинчатую (например, в слюдяной, шиферной и графитовой пыли) или волокнистую (например, в асбестовой и текстильной пыли) форму [4]. Поэтому на этапе цифровой обработки фотографий с помощью компьютерной программы существуют некоторые основные положения: так как размер частицы выражается диаметром шарообразной частицы, а на практике встречаются в основном частицы неправильной геометрической формы, то для выражения размера частицы часто пользуются понятием *эквивалентный диаметр*.

Эквивалентный диаметр частицы неправильной формы – диаметр шара, объем которого равен объему частицы, или диаметр круга, площадь которого одинакова с площадью проекции частицы. Способы определения эквивалентного диаметра различны [5].

Наиболее сложной задачей методики микроскопического анализа с точки зрения разработчика автоматизированного программного продукта

является компьютерная обработка микрофотографий (анализ графических данных). Ранее дисперсный состав пыли, выделяющейся в атмосферный воздух, определялся при помощи методик [6-7], диапазон измеряемых пылевидных частиц составлял от 0,5 до 100 мкм. Методики применялись при исследованиях в работах [8-11]. Так, например, в методиках использовалась компьютерная программа «Dust». В 2014 году было получено свидетельство на программу [12]. Программа предназначена для цифровой обработки черно-белых изображений по объему частиц дисперсных материалов и получения статистических данных при автоматизированном микроскопическом анализе. Для анализа данных необходимо загрузить черно-белую микрофотографию частиц и установить коэффициент пересчета пикселей в микрометры. По окончании сканирования изображения определяется дисперсный состав генеральной совокупности частиц в виде графиков и табличных значений.

Однако существующие программы имеют ряд недоработок.

Одной из задач программ является вычисление площади частицы (пятна) для определения эквивалентного диаметра и периметра для определения характеристик пылевых частиц.

Площадь пятна определяется как совокупность всех пикселей пятна. Алгоритм сканирования изображения представлен на рис. 2. При анализе работы программы [12] было выявлено: **различное расположение пикселей пятна влияет на расчет площади пятна** (рис. 3).

Расчет эквивалентного диаметра производится на основе формулы:

$$d_{\text{ЭКВ}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S}{\pi}}. \quad (1)$$

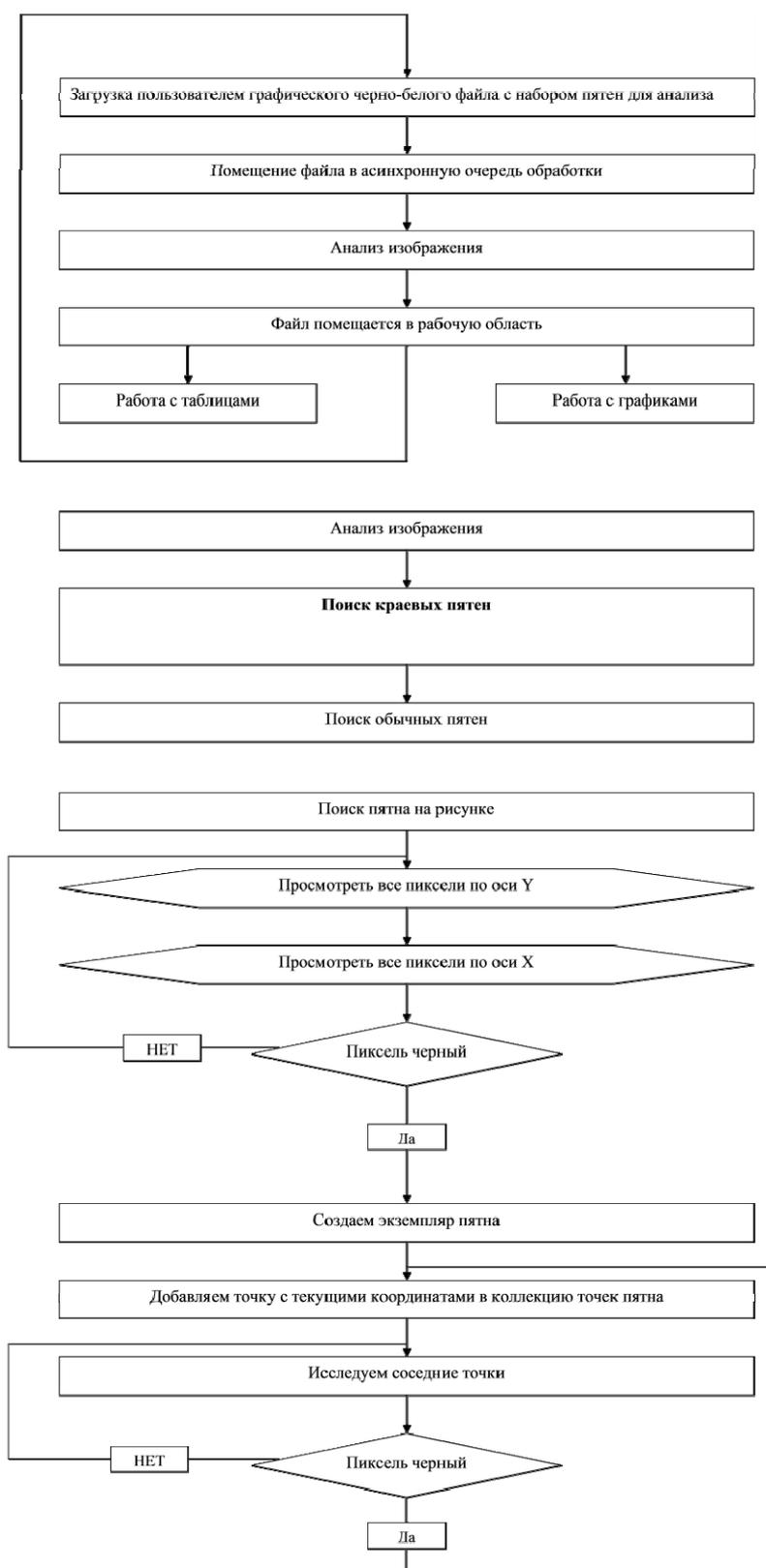


Рис. 2. Общий алгоритм работы программ анализа дисперсного состава частиц в части сканирования изображения

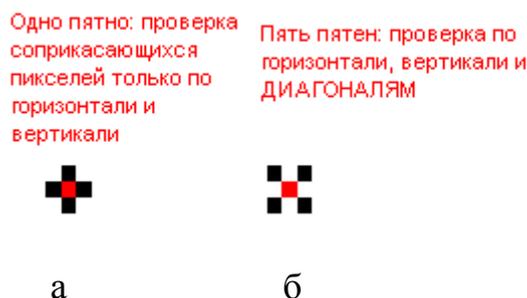


Рис. 3. Распознавание пикселей программой:

а – одно пятно; б – пять пятен.

Как видно, из рис. 3 в текущей версии пиксели считаются принадлежащими одному пятну, если они имеют общие границы (соприкасаются) по горизонтали и/или вертикали. Так, пять пикселей, образующих “крест”, это одно пятно. Те же пять пикселей на той же площади, но соприкасающиеся лишь углами по диагоналям, в программе воспринимаются как 5 отдельных пятен.

Для определения характеристик пыли (форма частиц) используется периметр пятна. Частица (пятно) приводится к эллипсу той же площади, затем рассчитывается соотношение $P_{\text{п}}/P_{\text{э}}$ ($P_{\text{п}}$ - периметр пятна, $P_{\text{э}}$ - периметр эллипса), отражающее коэффициент формы частицы.

Возьмем для примера пятно следующего вида (эллипс) (рис. 4). Размер одной ячейки сетки - один пиксель.

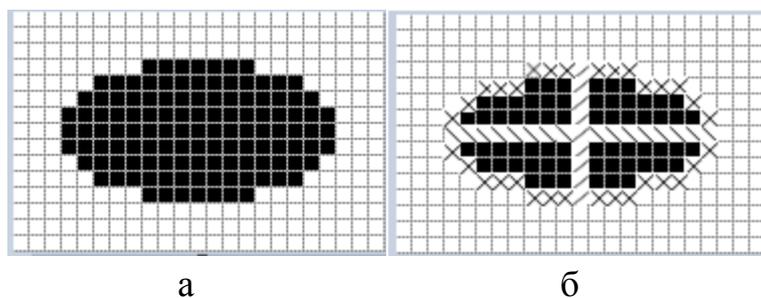


Рис. 4. Изображение для дальнейшего сканирования:

а – изображение для сканирования; б – изображение эллипса с полуосями и периметром (×- периметр P , / – минимальная полуось L_{\min} , \ - максимальная полуось L_{\max}).

Глядя на рис. 4, можно легко подсчитать, что периметр $P_{\Pi} = 36$, $L_{\max} = 17$, $L_{\min} = 9$.

Так же для простоты расчетов выставим в установках программы коэффициент пересчета пикселей в мкм – единица (рис. 5).

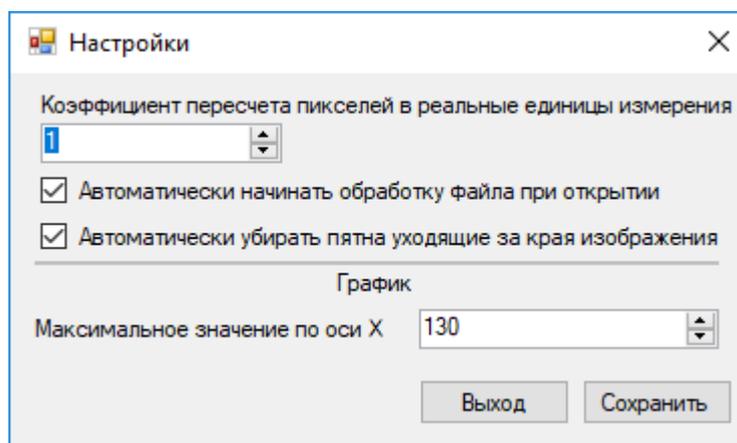


Рис. 5. Коэффициент пересчета пикселей

Результаты расчета программой периметров представлены на рис. 6.

	пятно №	коорд X т. входа	коорд Y т. входа	S	D экв	Lmax	Lmin	Lmin / Lmax	P(пятна)	P(эллипса)	P _н /P _э
▶	1	8	3	121	12.412	16	9.634	0.602	52	40.889	1.272

Рис. 6. Результаты расчета программой периметров

Как видно, алгоритм программы в данном случае выводит на экран значение периметра пятна $P_{\Pi} = 52$, что очень отличается от оригинала (рис.4), где $P_{\Pi} = 36$. Это связано с реализацией подсчета периметра проекции частицы с условием достраивания ее до идеальной формы эллипса. Необходимо отметить существующую погрешность при обработке микрофотографии и преобразовании черных/получерных крайних пятен в белые.

В данном случае расчет L_{\min} ведется по следующей формуле:

$$L_{\min} = \frac{4 \cdot S_{\Pi}}{\pi \cdot L_{\max}}, \quad (2)$$

Принимая площадь пятна $S_{\text{п}}$:

$$S = L_{\text{min}} \cdot L_{\text{max}} \cdot \quad (3)$$

Неточность расчетов периметра также обуславливается округлением числа π .

Выбор формулы для расчета периметра обусловлен решаемой задачей. Так, например, с точки зрения экологии и охраны труда, важное значение имеет содержание мелкодисперсной пыли. И при определении периметра должны использоваться методы с наибольшей вероятностью приводящие частицы к наименьшим размерам.

Рассмотрим этап сканирования, при котором появляется необходимость разделения «слипшихся пятен» (рис. 7). Человеческим глазом видны «слипшиеся частички» и границы для их разделения, однако для автоматизированной программы это не так очевидно и представляется сложной задачей.

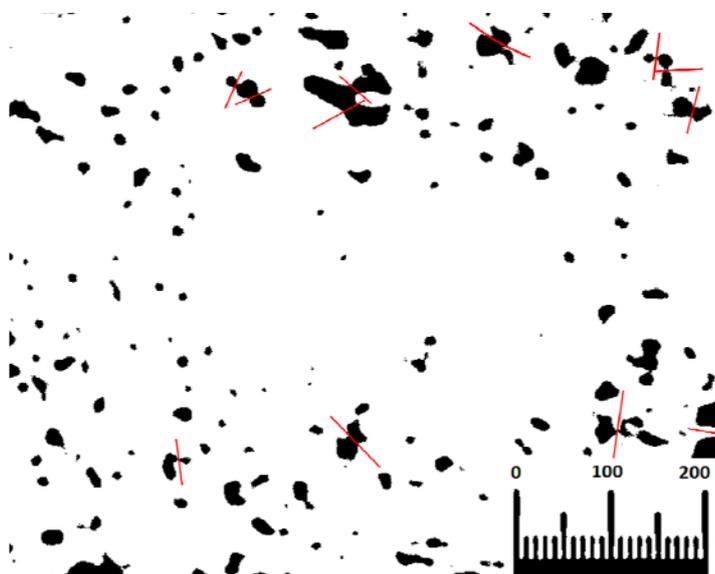


Рис. 7. Микрофотография частиц пыли и границы разделения «слипшихся пятен»

Авторами предлагается рассмотреть несколько вариантов обнаружения «слипшихся пятен»:

1. Исходя из заранее определяемой классификации частиц в исследуемой пробе, имеющих форму, приближенную к правильной: программа выявляет частицы формы, отличающейся от приведенной классификации, чем среднестатистические.

2. Исходя из заполняемости области расположения пятна – отношение черных пикселей.

3. В зависимости от соотношения длины окружности описанной частицы к длине вписанной частицы (пятна).

Таким образом, существующие недоработки компьютерной программы требуют устранения и усовершенствования алгоритма анализа дисперсного состава пыли в воздушной среде.

Литература

1. Коузов П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / 3-е изд., перераб. – Ленинград : Химия, 1987. 264 с. : ил. С. 18-22.

2. Королев Д. В., Наумов В. Н., Суворов К. А. Определение дисперсного состава порошков микроскопическим методом: Методические указания к лабораторной работе. — СПб.: ГОУ ВПО СПбГТИ(ТУ), 2005. — 41 с.

3. Гаврилова Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов: учеб. пособие / Н. Н. Гаврилова, В. В. Назаров, О.В. Яровая. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 52 с.

4. Фукс Н.А. Механика аэрозолей — М.: Изд. АН СССР, 1955. 90с.

5. Градус Л. Я. Руководство по дисперсионному анализу методом микроскопии. – М.: Химия, 1979. – 232 с.

6. Методика выполнения измерений дисперсного состава пыли с применением ПК в атмосферном воздухе и в воздухе рабочей зоны : утв. Госстандарт РФ 08. 08. 2003. - Волгоград, 2003.С.1-3.



7. Методика микроскопического анализа дисперсионного состава пыли с применением персонального компьютера (ПК) // Перечень методик измерений концентраций загрязняющих веществ в выбросах промышленных предприятий, допущенных к применению в 2014 году. Волгоград: ООО «ПТБ Волгоградгражданстрой», СПб.: ОАО «НИИ Атмосфера»; 2013, с. 1-3.

8. Азаров А.В. Расчётное обоснование уровня защищённости воздушной среды от негативного воздействия мелкодисперсной пыли предприятий по производству гипсовых строительных материалов // Инженерный вестник Дона, 2016, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3618.

9. Азаров, В.Н. Снижение выбросов систем обеспыливания с использованием дисперсионного анализа пыли в стройиндустрии // Инженерный вестник Дона, 2015. №1 (часть 2) URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_95_azarov.pdf_2cedb04647.pdf

10. Azarov A.V., Zhukova N.S., Kalyuzhina E.A. Environmental and Working Area Dust Emission from the Gypsum Warehouse // Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2016. – pp. 2080-2086.

11. Kozlovitseva E.Yu., Azarov V.N., Stefanenko I.V. Analysis of the dust particles distribution and ventilation as a way to improve indoor air quality // Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport - EMMFT 2017, 10-13 April 2017: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science / Far Eastern State Transport University, Russian Federation. - 2017. - Vol. 90. - 6 p. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/90/1/012025/pdf.



12. Программа обработки изображений частиц DUST1: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ DUST 1 №2014618468 от 24.08.2014 г.

References

1. Kouzov P. A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennykh pyley i izmelchennykh materialov [Fundamentals of analysis of the disperse composition of industrial dusts and crushed materials] 3-e izd. . pererab. Leningrad: Khimiya. 1987. 264 s.: il. pp. 18-22.

2. Korolev D. V. Naumov V. N. Suvorov K. A. Opredeleniye dispersnogo sostava poroshkov mikroskopicheskim metodom: Metodicheskiye ukazaniya k laboratornoy rabote [Determination of the disperse composition of powders by the microscopic method: Methodological instructions for laboratory work]. SPb.: GOU VPO SPbGTI(TU). 2005. 41 p.

3. Gavrilova N. N., Nazarov V. V., Yarovaya O.V. Mikroskopicheskiye metody opredeleniya razmerov chastits dispersnykh materialov: ucheb. Posobiye [Microscopic methods for determining the particle size of dispersed materials: Proc. allowance]. M.: RKhTU im. D. I. Mendeleyeva. 2012. 52 p.

4. Fuks N.A. Mekhanika aerorozley [Aerosol mechanics]. M.: Izd. AN SSSR. 1955. 90p.

5. Gradus L. Ya. Rukovodstvo po dispersionnomu analizu metodom mikroskopii [A Guide to Variance Analysis by Microscopy]. M.: Khimiya. 1979. 232 p.

6. Metodika vypolneniya izmereniy dispersnogo sostava pyli s primeneniym PK v atmosfernom vozdukh e i v vozdukh e rabochey zony: utv. Gosstandart RF 08. 08. 2003 [Methods for performing measurements of the dispersion of dust with the use of PC in the ambient air and in the air of the

working area: Gosstandart of the Russian Federation 08. 08. 2003]. Volgograd. 2003. pp.1-3.

7. Metodika mikroskopicheskogo analiza dispersionnogo sostava pyli s primeneniym personalnogo kompyutera (PK) [The method of microscopic analysis of the dispersion composition of dust using a personal computer (PC)]. Perechen metodik izmereniy kontsentratsiy zagryaznyayushchikh veshchestv v vybrosakh promyshlennykh predpriyatiy. dopushchennykh k primeneniyu v 2014 godu. Volgograd: OOO «PTB Volgogradgrazhdanstroy». SPB.: OAO «NII Atmosfera»; 2013. pp. 1-3.

8. Azarov A.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2016, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3618.

9. Azarov. V.N. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №1(part 2). URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_95_azarov.pdf_2cedb04647.pdf

10. A.V. Azarov, N.S. Zhukova, E.A. Kalyuzhina. Procedia Engineering. Vol. 150: 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) ed. by A.A. Radionov. [Elsevier publishing], 2016. pp. 2080-2086.

11. E.Yu. Kozlovitseva, V.N. Azarov, I.V. Stefanenko. Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport - EMMFT 2017, 10-13 April 2017: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. Far Eastern State Transport University, Russian Federation. 2017. Vol. 90. 6 p. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/90/1/012025/pdf.

12. Programma obrabotki izobrazheniy chastits DUST1: Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM DUST 1 №2014618468 ot 24.08.2014 g. [Particle image processing program DUST1: Certificate of state registration of the computer program DUST 1 No. 2014618468 of August 24, 2014.]