

Научная статья
УДК 628.511.132: 621.928.9

СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ДИСПЕРСНОГО АНАЛИЗА ПЫЛИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КОМБИКОРМОВ

¹Татьяна Ивановна Белова, ²Евгений Михайлович Агашков, ¹Степан Николаевич Камовский

¹ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, Брянская область, Кокино, Россия

²ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», Орловская область, Орёл, Россия

Аннотация. Эффективность улавливания пыли определяется размером частиц, информация о которых отсутствует для комбикормовых и зерноперерабатывающих производств за исключением мукомольной отрасли, переработки подсолнечника и ряда других производств. Определение дисперсного состава пыли основано на её физико-химических свойствах и может отличаться от метода исследования, среди которых широкое распространение получили ситовой, седиментометрический, центробежной сепарации, оптический и микроскопирования. Также для оперативного определения дисперсного состава пыли используются счетчики частиц, которые определяют количество частиц в единице объёма воздуха без предварительного осаждения. Наиболее современным методом является оптический, основанный на способе лазерной дифракции, где осуществляется лазерное зондирование отобранных проб пыли. Но из всех методов подходящим для пылей комбикормового производства является метод микроскопирования аналитических фильтров с определенной концентрацией пыли в воздухе, который реализуется с помощью светового микроскопа и цифровой камеры. В этом случае имеется возможность определения линейных размеров частиц и их формы, по которым рассчитывается аэродинамический диаметр частиц. По этим характеристикам определяется дисперсный состав пыли до выгрузки подсолнечного шрота по количеству частиц, проводится оценка распределения их по массе и за счёт установленной концентрации на основе гравиметрического метода согласно логарифмическому нормальному закону были получены данные содержания частиц размером до 2,5 мкм и до 10 мкм (параметры РМ 2.5 и РМ10).

Ключевые слова. Комбикормовое производство, пыль, дисперсный состав, размер частиц, форма частиц, фракционный состав.

Для цитирования: Белова Т.И., Агашков Е.М., Камовский С.Н. Современные способы дисперсного анализа пыли при производстве комбикормов // Вестник Брянской ГСХА. 2024. № 2 (102). С. 72-77.

Original article

MODERN METHODS OF DISPERSE DUST ANALYSIS IN MIXED FODDER PRODUCTION

¹Tat'yana I. Belova, ²Evgeny M. Agashkov, ¹Stepan N. Kamovski

¹ Bryansk State Agrarian University, Bryansk region, Kokino, Russia

² Oryol State University named after I.S. Turgenev, Oryol region, Oryol, Russia

Abstract. The efficiency of dust capture is determined by the size of particles, information about which is not available for mixed fodder and grain processing industries, with the exception of the flour milling industry, sunflower processing and a number of other industries. The determination of the disperse composition of dust is based on its physicochemical properties and may differ from the research method, among which sieve, sedimentometric, centrifugal separation, optical and microscopy are widespread. Also, particle counters are used to quickly determine the disperse composition of dust, which determine the number of particles per unit volume of air without preliminary precipitation. The most modern method is optical, based on the method of laser diffraction, where laser probing of selected dust samples is carried out. But of all the methods suitable for the dust of mixed fodder production is the method of microscopy of analytical filters with a certain concentration of dust in the air, which is implemented using a light microscope and a digital camera. In this case, it is possible to determine the linear dimensions of the particles and their shape, from which the aerodynamic diameter of the particles is calculated. According to these characteristics, the disperse composition of dust before unloading sunflower meal is determined by the number of particles, their mass distribution is estimated, and due to the established concentration on the basis of the gravimetric method, according to the logarithmic normal law, data on the content of particles up to 2.5 microns and up to 10 microns were obtained (parameters PM 2.5 and PM 10).

Key words: mixed fodder production, dust, disperse composition, particle size, particle shape, fractional composition.

For citation: Belova T.I., Agashkov E.M., Kamovski S.N. Modern methods of disperse dust analysis in mixed fodder production // Vestnik of the Bryansk State Agricultural Academy. 2024. 2(102). 72-77.

Введение. На всех предприятиях по переработке сырья растительного происхождения существует проблема запыленности воздуха рабочей зоны и потери ценных материалов в ходе технологических процессов [1,2,3]. Откуда возникают две задачи: 1 – снижение запыленности и улавливание пыли для дальнейшего использования в производстве; 2 – степень воздействия её на организм человека, что обусловлено размером частиц пыли. Сегодня существуют данные о дисперсном составе пыли при сжигании углей и горючих сланцев, в металлургии, химических производствах, при производстве строительных материалов, муки, переработке подсолнечника, но отсутствуют в полной мере при производстве комбикормов [4,5].

Получение этих данных возможно использованием различных методов проведения дисперсного анализа, результаты которых разнятся, которые дают такие результаты, но при этом их можно использовать при проектировании устройств обеспыливания, функционирующих на разных принципах улавливания пыли.

Методы и способы определения дисперсного состава пылей. По способу отбора проб определение дисперсного состава пыли делится на методы с предварительным осаждением и без предварительного осаждения пыли. Во втором случае дисперсный состав определяется непосредственно в воздухе на основе оптических свойств пыли. Для этого могут быть использованы счётчики частиц отечественного производства (АЗ-5, АЗ-10) и зарубежные (FLUKE 983, FLUKE 985) [6,7]. Счётчики позволяют определять в одном литре воздуха количество частиц размером $> 0,3$ мкм, $> 0,5$ мкм, $> 1,0$ мкм, $> 2,0$ мкм, $> 5,0$ мкм, $> 10,0$ мкм. Достоинствами этих приборов являются простота эксплуатации, возможность непрерывного контроля, получение оперативных данных о дисперсном составе аэрозоля в количественном отношении с достаточно высокой точностью. Необходимо отметить, что основным применением указанных приборов является определение класса чистоты помещений и зон [8].

Недостатки счётчиков частиц связаны с: проблематичностью оценки дисперсного состава в долях по массе из-за отсутствия учёта формы частиц, использованием их только при температуре воздуха в пределах от $+10^{\circ}\text{C}$ до $+40^{\circ}\text{C}$, что не позволяет проводить измерения запыленности на всех процессах производства комбикормов, и достаточно высокой ценой.

Эти недостатки можно устранить с использованием методов с предварительным осаждением пыли, к которым относятся ситовый, седиментометрический, центробежной сепарации, лазерной дифракции и микроскопирования [9].

Ситовый метод основан на последовательном просеивании образца пыли через набор лабораторных сит с различными размерами ячеек и последующим взвешиванием прохода или остатка на сите. Существуют сита с размером квадратных ячеек в 5 мкм и выше. Для анализа требуется наличие двух навесок массой не менее 500 мг, и чтобы отклонения по массе каждой фракции в навесках составляли не более 2%. В этом случае ситовый анализ представляет собой достаточно простой метод в использовании, но предъявляет высокие требования к ситам по прочности, по инертности к электростатическим и адгезионным свойствам пыли, и необходимости использования специальной вибрационной машины. Также к недостаткам ситового метода следует отнести отсутствие возможности определения формы частиц, которая определяет их скорость витания.

Получение данных о дисперсном составе пыли, которые могут быть использованы для более точного расчета инерционных аппаратов пылеочистки и для оценки вероятности проникновения пыли в организм человека, возможно с использованием методов седиментометрического и центробежной сепарации.

При использовании седиментометрического метода происходит осаждение частиц в жидкостях, где скорость осаждения зависит от их размера. В дальнейшем происходит отбор пыли из жидкости и их последующего взвешивания. Осаждение также можно производить в ротаметрических классификаторах, где за счёт задачи скорости движения воздуха определяют массу осевшей пыли и рассчитывают аэродинамический диаметр частиц. Недостатками метода являются необходимость наличия достаточно больших навесок пыли, постоянного контроля за осаждением частиц, чтобы вовремя производить отбор осевшей пыли для взвешивания, и зависимость результатов от физико-химические процессы взаимодействия жидкости и пыли. Для частиц размером менее 5 мкм скорости витания составляют менее 1 мм/с, что приводит к увеличению длительности исследования, а также – габаритов оборудования и погрешности измерений.

Метод центробежной сепарации позволяет ускорить процесс осаждения частиц пыли разного диаметра, так как действие центробежной силы больше, чем силы тяжести. При этом имеется возможность качественного разделения частиц пыли на фракции, но предъявляются высокие требования к качеству исполнения оборудования, так как возможно не только забивание отверстий частиц пыли, но и их измельчение вследствие соударения со стенками прибора на больших скоростях. Исследова-

ние дисперсного состава слипающихся и волокнистых пылей в этом случае также затруднительна. Кроме этого, как и в случае использования ситового и седиментометрического методов, является необходимость достаточно большой навески пыли. Поэтому эти методы часто используются при анализе порошков и имеют ограничения по исследованию запыленности в воздухе при концентрации менее 1 мг/м^3 .

В методе лазерной дифракции также необходимо использовать только предварительно осевшую пыль, и зачастую результаты дисперсного анализа представляются в количественном отношении. Но за счет использования оптического анализатора возрастает скорость проведения исследования, а также имеется возможность фиксирования частиц размером $0,01 \text{ мкм}$ [9]. При этом, как и в случае других оптических методов, отсутствует возможность оценки формы частиц, что приводит к некорректным результатам при расчёте инерционных аппаратов, и некорректной оценке дисперсного состава пыли по массе, либо имеется возможность оценки размера и формы частиц (размером более 5 мкм) в жидкой среде. Оборудование для проведения лазерной дифракции достаточно дорогостоящее, что ограничивает его использование на предприятиях.

Метод микроскопирования позволяет определить дисперсный состав пыли путём рассматривания образцов в световом микроскопе при увеличении не менее $40\times$. Причём образцы могут быть получены гравиметрическим методом на аналитических фильтрах, и путём осаждения на предметные стёкла, другие специальные поверхности. В современных условиях для упрощения проведения исследований используют цифровые камеры, которые позволяют получить микрофотографии высокого разрешения для последующей обработки. При этом можно определить достаточно точные параметры дисперсного состава по количеству частиц, а при получении распределения по массе возможна только оценка, так как из-за сложной формы частиц их объём только оценивается. Как правило, современные программные средства кроме линейных размеров частиц позволяют получать коэффициенты, учитывающие форму частиц, по которым определяют эффективный диаметр частиц, близкий к аэродинамическому. Существуют государственные стандарты на определение дисперсного состава пылей и для определения форм частиц порошкообразных материалов, в которых используются микроскопические исследования [9, 10].

На выбор метода исследования дисперсного состава пылей влияют токсичность пыли, её концентрация, способ отбора проб, необходимая точность, наличие необходимого оборудования. При наших исследованиях на выбор метода повлияли отборы проб гравиметрическим способом, необходимость получения данных о дисперсном составе в количественном и массовом распределении и наличие микроскопа с цифровой камерой.

Методика и результаты исследования. Для отбора пробы пыли подсолнечного шрота с приёмного пункта комбикормового предприятия был использован гравиметрический метод с помощью аспиратора ПУ-4Э, аналитических фильтров АФА-ВП-10 при концентрации пыли в воздухе в пределах $3,15\text{-}2380 \text{ мг/м}^3$.

Приведены сведения [6] о дисперсном составе пыли подсолнечного шрота до разгрузки по максимальному линейному размеру, что приводит к необходимости определения параметров с учётом формы частиц. Для этого аналитические фильтры подвергались микроскопированию на микроскопе с объективом увеличением $10\times$ и дальнейшей обработке в программах Paint.net и ImageJ [4, 5, 11, 12].

На рисунке 1 представлены микрофотографии пыли подсолнечного шрота до его выгрузки.

На основе дальнейшей обработки изображений в программе ImageJ получены данные для каждой обнаруженной частицы о максимальном линейном размере, площади проекции, периметре, отношении максимального линейного размера к минимальному размеру. На основании этих данных производим расчеты аэродинамического диаметра, а также определяем параметры дисперсного состава по количеству (средний размер частиц $d_{\text{срк}}$, мкм, и логарифмическое среднеквадратическое отклонение $\lg \sigma_k$) и производим оценку параметров дисперсного состава по массе (средний размер частиц $d_{\text{срм}}$, мкм, логарифмическое среднеквадратическое отклонение $\lg \sigma_m$, содержание частиц размером до $2,5 \text{ мкм PM}_{2.5}$, мг/м^3 , и до 10 мкм PM_{10} , мг/м^3).

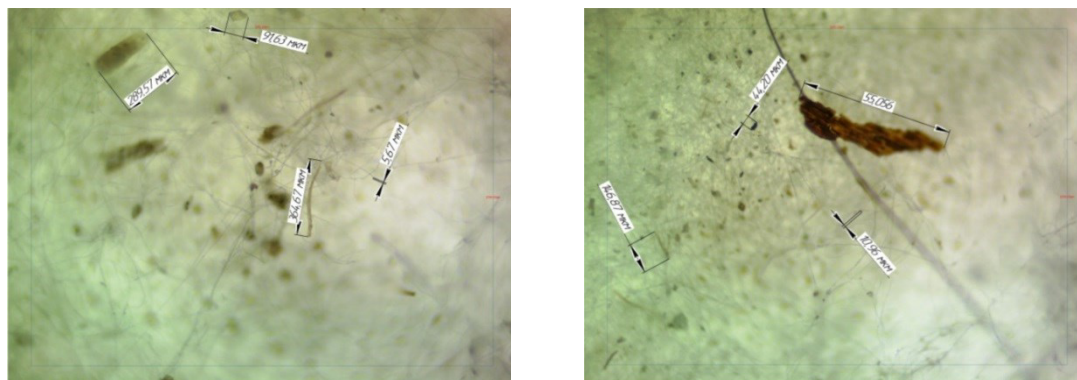


Рисунок 1 - Микрофотографии пыли подсолнечного шрота до выгрузки

После этого производится обработка полученных изображений в программе ImageJ с получением контрастных фотографий, где отображаются частицы пыли.

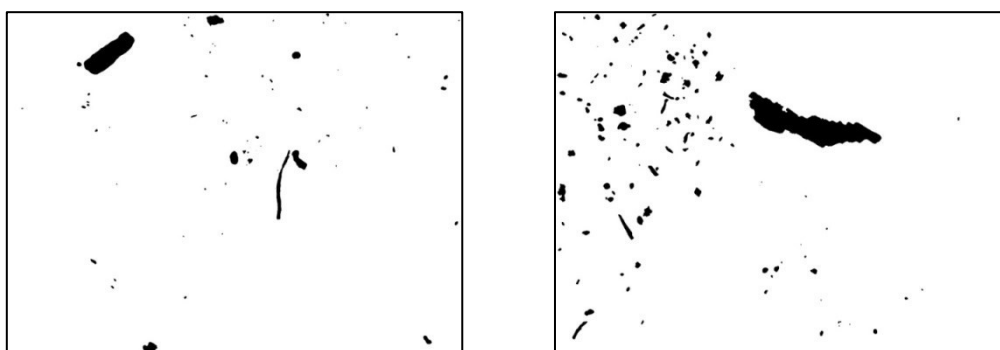


Рисунок 2 – Микрофотографии с выделенными частицами

В результате обработки изображений было обнаружено 3345 частиц, из которых наименьший линейный размер составлял 2,17 мкм, наибольший линейный размер – 734,53 мкм, наименьшая площадь проекции частицы – 1,89 мкм², наибольшая площадь проекции частицы – 79961,42 мкм² и наибольшее отношение размеров частиц – 13,72.

В таблице 1 представлены параметры дисперсного состава пыли до разгрузки подсолнечного шрота.

Таблица 1 - Параметры дисперсного состава пыли до выгрузки подсолнечного шрота

Наименование параметра	Размер частиц фракции, мкм						
	≤ 2,5	2,5-5	5-10	10-25	25-50	50-100	100≤
Дисперсный состав по количеству							
φ _л , %	0,21	2,77	15,36	46,45	26,64	7,34	1,23
φ _а , %	1,20	6,69	25,69	52,07	13,12	1,23	1,20
d _{ср} , мкм:							
- по максимальному линейному размеру	19,01						
- по аэродинамическому диаметру	12,8						
lg σ:							
- по максимальному линейному размеру	0,309						
- по аэродинамическому диаметру	0,282						
Оценка дисперсного состава по массе							
φ _л , %	1,36 · 10 ⁻⁴	0,01	0,30	9,10	30,59	39,37	20,64
φ _а , %	1,06 · 10 ⁻³	0,04	1,13	23,39	45,46	29,98	0,04
d _{ср} , мкм:							
- по максимальному линейному размеру	58,61						
- по аэродинамическому диаметру	36,9						
lg σ:							
- по максимальному линейному размеру	0,267						
- по аэродинамическому диаметру	0,271						

Примечание. φ_л – содержание согласно экспериментальным данным по наибольшему линейному размеру; φ_а – содержание согласно экспериментальным данным по аэродинамическому диаметру

Исходя из этих значений концентрации частиц размером до 2,5 мкм и 10 мкм в пыли до выгрузки подсолнечного шрота составляли $6,27 \cdot 10^{-5}$ и $0,12 \text{ мг/м}^3$, соответственно.

Для полноты исследования и возможности использования полученных значений (табл. 2, рис. 1) приведены характеристики форм частиц [10].

Таблица 2 – Формы частиц пыли по фракциям до выгрузки подсолнечного шрота

Форма частиц	Размер частиц фракции, мкм						
	≤ 2,5	2,5-5	5-10	10-25	25-50	50-100	100≤
Доля частиц по максимальному линейному размеру, %							
сферическая	28,57	25	28,18	21,04	12,64	6,15	4,88
округлая	57,14	67,39	63,99	64,79	61,17	50,82	31,71
угловатая	14,29	7,61	7,83	14,17	25,73	40,98	26,83
стержневая	0	0	0	0	0,45	2,05	36,59
игольчатая	0	0	0	0	0	0	0
Доля частиц по аэродинамическому диаметру, %							
сферическая	22,50	17,94	23,01	17,23	16,25	6,15	17,07
округлая	62,50	64,57	61,57	62,54	59,73	50,82	73,17
угловатая	15,00	17,49	15,30	19,60	19,45	40,98	9,76
стержневая	0	0	0,12	0,63	4,58	2,05	0
игольчатая	0	0	0	0	0	0	0

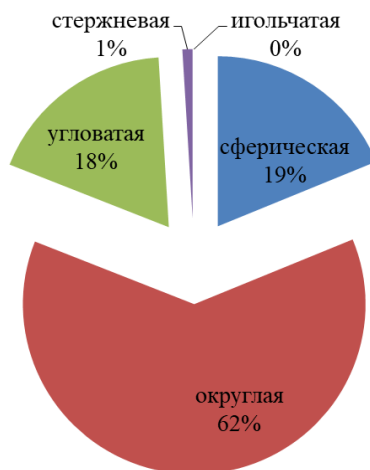


Рисунок 1 – Морфологический состав пыли до выгрузки подсолнечного шрота

Заключение. Использование метода микроскопирования при исследовании дисперсного состава пыли имеет место в случае запылённости воздуха рабочей зоны, концентрацию которой возможно определить гравиметрическим методом и выделяются различные виды пылей. Данная ситуация складывается при переработке зерновых и другого сырья растительного происхождения, т. е. на комбикормовых предприятиях, крупомольных, пищевых концентратных производствах и др. В дальнейшем данные о пыли до выгрузки подсолнечного шрота могут быть использованы для оценки риска получения профессиональных заболеваний и вероятности рассеивания пылевых частиц в воздухе производственных помещений и атмосферном.

Список источников

1. Горбачев И.В., Панова Т.В., Панов М.В. Моделирование и оптимизация процесса послеуборочной обработки зерна // Инновации в сельском хозяйстве. 2018. № 3 (28). С. 279-287.
2. Grain drying complex based on an alternative energy source / A.I. Kupreenko, E.M. Baydakov, Kh.M. Isaev, A.N. Chenin // Труды ГОСНИТИ. 2020. Т. 120. С. 49
3. Ensuring the protection of the environment at the combined feed mills / T.I. Belova, E.M. Agaskov, E.G. Chernova, S.V. Terekhov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 698, Construction of roads, bridges, tunnels and airfields. – Режим доступа: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/698/7/077064/pdf>. (дата обращения: 23.10.2023)
4. Исследование запыленности воздуха при приемке подсолнечного шрота / Т.И. Белова, В.С. Шкрабак, Е.М. Агашков и др. // Аграрный научный журнал. 2023. № 1. С. 117-123.

5. Запыленность воздуха на приемном пункте после выгрузки подсолнечного шрота / Т.И. Белова, В.С. Шкрабак, Е.М. Агашков и др. // Известия международной академии аграрного образования .2023. № 66 . С. 18-26.

6. <https://all-pribors.ru/opisanie/54041-13-fluke-985-57572#ot>

7. <https://gazoanalit.ru/catalog/perenosnye1/schetchik-chastits-az-10/>

8. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Ч. 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц: ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017. Введ. 2018-12-01. М.: Стандартиформ, 2017. 30 с.

9. <https://www.fritsch.com.ru/izmerenie-razmera-chastic/staticheskoe-rassejanie-sveta/detali/produkty/lazernyi-pribor-dlja-izmerenija-razmera-chastic-analyssette-22-next-nano/>

10. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Исследование фракционного состава пыли оптическим методом при нормировании качества атмосферного воздуха: ГОСТ Р 56929-2016. Введ. 2017-02-01. М.: Стандартиформ, 2019. 16 с.

11. Проблемы определения дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны комбикормовых предприятий / Т.И. Белова, В.С. Шкрабак, А.П. Савельев, Е.М. Агашков // Безопасность жизнедеятельности. 2022. № 9. С. 24-30.

12. Погрешности метода микроскопирования при определении размеров частиц пыли овса / Е.М. Агашков, Т.И. Белова, Т.М. Осадца, К.А. Харченко // Безопасный и комфортный город: материалы VI междунар. науч.-практ. конф. Орёл, 2023. С. 488-492.

Информация об авторах:

Т.И. Белова – доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ, belova911@mail.ru

Е.М. Агашков - кандидат технических наук, доцент кафедры техносферной безопасности, ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», evgenii-agashkov@mail.ru

С.Н. Камовский – студент, ФГБОУ ВО Брянский ГАУ

Information about the authors:

T.I. Belova - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Life Safety and Engineering Ecology, Bryansk State Agrarian University, panovatava@yandex.ru.

E.M. Agashkov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technosphere Safety, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Orel State University named after I.S. Turgenev».

S.N. Kamovski – Student, Bryansk State Agrarian University.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные. Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors are responsible for their work and the data provided. All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and are equally responsible for plagiarism. The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 10.11.2023; одобрена после рецензирования 20.03.2024, принята к публикации 26.03.2024 .

The article was submitted 10.11.2023; approved after reviewing 20.03.2024; accepted for publication 26.03.2024.

© Белова Т.И., Агашков Е.М., Камовский С.Н.