

Оригинальное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-292-312

УДК 504.3.054

И.М. Колесник, Е.А. Белова, Г.Г. Юхневич

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
230023 г. Гродно, Республика Беларусь

Дисперсный состав взвешенных частиц в воздухе рабочей зоны предприятий

Приведены результаты исследований воздуха рабочей зоны предприятий металлообрабатывающей, деревообрабатывающей и строительной промышленности на содержание твердых частиц гравиметрическим методом с последующей световой микроскопией осветленных фильтров. Установлено, что массовая концентрация и дисперсный состав пыли в воздухе рабочей зоны предприятий зависит от вида и технологического процесса выпускаемой продукции. Максимальная массовая концентрация взвешенных частиц выявлена в воздухе при фрезеровке древесноволокнистых плит средней плотности на предприятии по производству мебели, тогда как максимальное количество взвешенных частиц – при литье металлических изделий и прессовании изделий из древесноволокнистых плит. Наиболее распространенной фракцией в воздухе при производстве кирпичей и блоков, прессовании и фрезеровке изделий из древесноволокнистых плит, литье и обработке металлов являются частицы размерами 1–2,5 мкм. Отличия во фракционном составе взвешенных частиц в воздухе разных цехов обусловлены в основном количеством частиц с диаметром 0,5–1 мкм и 5–10 мкм. Приведенные исследования могут быть использованы для

разработки нормативов предельно допустимых концентраций мелкодисперсных фракций пылевых частиц в воздухе рабочей зоны предприятий, для оценки условий труда и профессионального риска при технологических процессах.

Ключевые слова: воздух рабочей зоны предприятий, количество взвешенных частиц, массовая концентрация взвешенных частиц, размер твердых частиц в воздухе

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 2.01.14 Государственной программы научных исследований Республики Беларусь на 2021–2025 годы «Природные ресурсы и окружающая среда».

Для ЦИТИРОВАНИЯ: Колесник И.М., Белова Е.А., Юхневич Г.Г. Дисперсный состав взвешенных частиц в воздухе рабочей зоны предприятий // Социально-экологические технологии. 2023. Т. 13. № 3. С. 292–312. DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-292-312

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-292-312

I.M. Kalesnik, E.A. Byalova, H.G. Yukhnevich

Yanka Kupala State University of Grodno,
Grodno, 230023, Belarus

Dispersed composition of particulate matter in the air of enterprises workplaces

The research results of the air of the working area of the metalworking, woodworking and construction industry on the presence of solid particles with the usage of gravimetric method and the following optical light microscopy of clarified filters are presented. It has been established that the mass concentrations and the dispersed composition of particulate matter in the air of the industrial plants depend on the type and technological process of the manufactured goods. Maximum mass concentration of the particulate matter has been identified in the workplace air in medium density fiberboards (MDF) milling, while the maximum amount of the particles has been

discovered during the casting of metal products and the pressing of products from MDF. The most widespread fraction in the workplace air in bricks and blocks production, pressing and milling of MDF products, casting and metalworking are the particles 1–2.5 μm in size. The difference in the fraction composition of the suspended particles in the different workshops is caused mainly by the quantity of particles with a diameter 0.5–1 μm and 5–10 μm . These studies can be used to develop standards for the maximum permissible concentrations of fine dispersed fractions of particulate matter in the workplace air of enterprises, and to assess working conditions and professional risk in manufacturing processes.

Key words: workplace air of plants, number and mass concentration of particulate matter, size of particles

Acknowledgments. The study was carried out within task 2.01.14 of the State Program of Scientific Research of the Republic of Belarus for 2021–2025 “Natural Resources and Environment”.

FOR CITATION: Kalesnik I.M., Byalova E.A., Yukhnevich H.G. Dispersed composition of particulate matter in the air of enterprises workplaces. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2023. Vol. 13. No. 3. Pp. 292–312. (In Rus.) DOI: 10.31862/2500-2961-2023-13-3-292-312

Введение

В современных условиях показатели медико-демографических потерь населения во многих странах напрямую зависят от уровня загрязнения воздуха взвешенными частицами (*particulate matter*, *PM*) [Mangia et al., 2020]. Многочисленные технологические процессы и операции в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве сопровождаются образованием и выделением пыли, воздействию которой могут подвергаться большое количество работников этих сфер. В производственных условиях с образованием пыли чаще всего связаны процессы дробления, размола, просева, обточки, распиловки, пересыпки и других перемещений сыпучих материалов, сгорания, плавления и др. [Чомаева, 2015].

Химический состав пыли достаточно разнообразен, что в существенной мере обусловлено спецификой технологических процессов, производственных операций, составом используемых на предприятиях материалов и сырья. Обращает на себя внимание присутствие в составе промышленной пыли многих предприятий активных органических и минеральных сорбентов (сажа, пыль древесная, коксовая, крахмала, доломита, соды, извести, талька, цемента и др.) [Янин, 2004].

При регулировании качества воздуха в первую очередь определяют массовые концентрации пылевидных частиц. Однако имеются данные, что при определении последствий для здоровья человека числовые концентрации частиц имеют большее значение, чем массовые концентрации частиц, т.к. в массовых концентрациях пыли обычно преобладают частицы большего размера [Chen et al., 2017]. Эпидемиологические исследования показали, что основная часть неблагоприятных последствий для здоровья связана с частицами диаметром менее 10 мкм (PM_{10}), 2,5 мкм ($PM_{2,5}$) и 1 мкм (PM_1)¹.

Переносимые по воздуху твердые частицы оказывают неблагоприятное воздействие на здоровье человека, особенно на дыхательную и сердечно-сосудистую системы. Появляется все больше свидетельств того, что размер твердых частиц определяет специфику их взаимодействия с организмом человека при вдыхании. От размера частиц зависят места их отложения в легких. Частицы PM_{10} с большей вероятностью оседают на поверхности более крупных дыхательных путей в верхней части легкого, тогда как частицы $PM_{2,5}$ и PM_1 с большей вероятностью попадут в более глубокие отделы, вызывая повреждение тканей и воспаление легких. Частицы $PM_{2,5}$ способны преодолевать аэрогематический барьер в легких и попадать в кровеносную систему, а ультрадисперсные частицы (PM_1) способны проходить через клеточные мембраны, нарушать функционирование и энергетическое состояние клеток [Механизм патологического действия..., 2017]. Одним из основных механизмов токсического действия микроразмерных частиц является их способность индуцировать выработку активных форм кислорода и радикалов, нарушать клеточную антиоксидантную способность и приводить к развитию окислительного стресса, сопровождающегося повреждением ключевых клеточных компонентов, таких как липиды, белки и нуклеиновые кислоты [Vitkina et al., 2016; Ответная реакция..., 2016]. Как результат, микрочастицы обладают провоспалительным, канцерогенным, тератогенным, цитотоксическим, аллергопатическим действием.

В результате, даже относительно умеренные уровни воздействия мелкодисперсных фракций частиц могут влиять на производительность труда из-за изменений артериального давления; раздражения уха, носа, горла и легких; и умеренных головных болей [Уланова, Гилева, Волкова, 2015; Исследование наноразмерных частиц..., 2017]. Хроническое воздействие твердых частиц усугубляет риск развития сердечно-

¹ WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. World Health Organization: Geneva, Switzerland. 2021.

сосудистых и респираторных заболеваний, а также рака легких [Mate et al., 2010; Yorifuji, Kashima, Doi, 2016; Amoatey et al., 2020]. Невозможность их быстрого выведения из организма приводит к накоплению микрочастиц в органах и тканях, что в долгосрочной перспективе может сопровождаться госпитализацией и смертностью.

В связи с этим, для лучшего понимания условий труда и оценки профессионального риска при производственных процессах необходимо учитывать особенности размерности взвешенных частиц в выбросах различных источников на рабочем месте сотрудников.

Цель работы – исследование дисперсного состава взвешенных частиц в воздухе рабочей зоны предприятий металлообрабатывающей, деревообрабатывающей и строительной промышленности при различных технологических процессах.

Материалы и методы

Для анализа количества и структуры взвешенных частиц производился отбор проб воздуха рабочей зоны в цехах промышленных предприятий города Гродно, относящихся к металлообработке, деревообработке и производству строительных материалов. Отбор проб воздуха осуществляли аспиратором ПУ-3Э с фильтрами АФА-ВП-20. Воздухозаборное устройство устанавливали на расстоянии 1 м от работающего оборудования, на высоте 1,5 м от пола – в зоне дыхания работника. Продолжительность отбора одиночной пробы составляла 20 мин в режиме 75 дм³/мин. Общий объем одиночной пробы составлял 1,5 м³. При каждом технологическом процессе выполняли три пробоотбора через каждые два часа после начала рабочей смены в трехкратной повторности. Массовую концентрацию твердых частиц определяли гравиметрическим методом².

В лаборатории фильтры с адсорбированными пылевидными частицами просветляли в парах ацетона и осуществляли микроскопическое изучение твердых частиц с помощью микроскопа «МИКМЕД-6» (объектив ×40, видеоокуляр «Tour Cam» 14.0 MP, адаптер TourTek FMA050). На каждом фильтре в 30 полях зрения подсчитывали количество частиц и измеряли их размеры [Световая микроскопия..., 2022].

Оценка диаметра частиц воздуха рабочей зоны предприятий позволила распределить твердые частицы в зависимости от гранулометрического состава на шесть фракций: >10 мкм; 5–10 мкм; 2,5–5 мкм; 1–2,5 мкм;

² МН 5093–2014. Методика выполнения измерений «Определение концентрации твердых частиц (недифференцированная по составу пыль/аэрозоль) в атмосферном воздухе. Гравиметрический метод». Мн., 2014.

0,5–1 мкм; 0,3–0,5 мкм. Получены шесть репрезентативных выборок объемом от 1585 (цех металлообработки) до 4384 вариантов (цех литья).

Статистическую обработку полученных данных проводили с использованием пакета STATISTICA 10 и стандартного приложения Microsoft Office Excel 2010. Качественные признаки описывали посредством выборочных долей. Кластерный анализ осуществляли по методу одиночной связи и методу *k*-средних. Количественные признаки характеризовали посредством общепринятых показателей описательной статистики с учетом типа распределения данных [Жукова, Минец, 2019]. При оценке характера распределения данных применяли коэффициент Стьюдента для асимметрии и эксцесса. Проверку гипотезы о наличии корреляций между признаками осуществляли посредством непараметрического критерия Спирмана, а сравнение медианных значений в выборках – на основе *Z*-критерия в тесте Манна–Уитни [Боровиков В.П., Боровиков И.П., 1998].

Результаты и обсуждение

Массовая концентрация твердых частиц в воздухе рабочей зоны цехов предприятий металлообрабатывающей, деревообрабатывающей и строительной промышленности различалась более чем в 6 раз. Минимальные значения данного показателя были зафиксированы в цехе производства блоков ($254,00 \pm 7,12$ мкг/м³), амаксимальные – в цехе фрезеровки древесноволокнистых плит МДФ (англ. *medium-density fibreboard*, MDF) ($1631,00 \pm 61,73$ мкг/м³) (рис. 1).

Микроскопическое изучение адсорбированных на фильтрах твердых частиц показало, что значения численной концентрации частиц в воздухе рабочей зоны составили от $(11,71 \pm 0,39) \times 10^6$ шт/м³ в цехе металлообработки до $(46,67 \pm 2,11) \times 10^6$ шт/м³ в цехе литья (рис. 2).

Таким образом, проявилась некоторая специфика пылевого загрязнения в каждой из трех отраслей промышленности. Массовая концентрация пылевых частиц в двух цехах предприятия по деревообработке в сумме оказалась в 3,8 раза больше, чем в двух цехах предприятия по производству строительных материалов, промежуточное положение заняли цеха предприятия по металлообработке. Суммарное же количество частиц в воздухе двух цехов практически не зависело от принадлежности к отрасли промышленности при небольшом превышении для цехов предприятия по деревообработке.

Достоверная корреляционная зависимость между массовой и числовой концентрацией частиц в воздухе рабочей зоны при различных технологических процессах не обнаружена.



Рис. 1. Массовая концентрация пылевых частиц в воздухе рабочей зоны предприятий:

1 – литье металла; 2 – металлообработка; 3 – производство блоков;
4 – производство кирпича; 5 – прессование МДФ; 6 – фрезеровка МДФ

Fig. 1. Mass concentration of particulate matter in the workplace air of plant:

1 – metal casting; 2 – metal processing; 3 – block production;
4 – brick production; 5 – MDF pressing; 6 – MDF milling

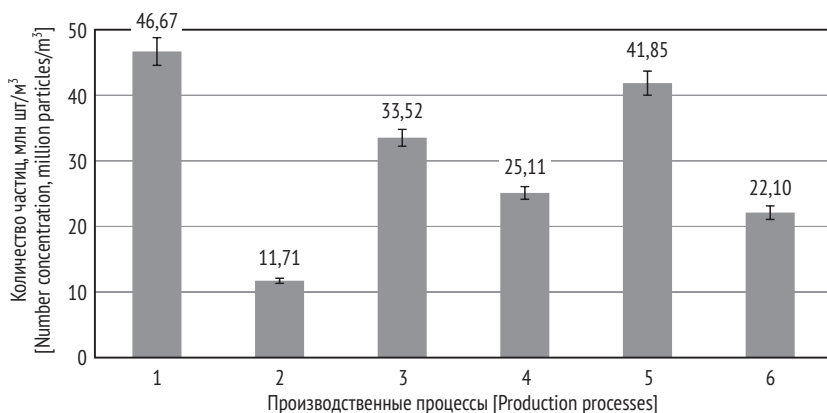


Рис. 2. Количество частиц в воздухе рабочей зоны цехов предприятий:

1 – литье металла; 2 – металлообработка; 3 – производство блоков;
4 – производство кирпича; 5 – прессование МДФ; 6 – фрезеровка МДФ

Fig. 2. Number of particles in the workplace air of plants:

1 – metal casting; 2 – metal processing; 3 – block production;
4 – brick production; 5 – MDF pressing; 6 – MDF milling

В пределах каждого из предприятий наблюдается тенденция к уменьшению массовой концентрации взвешенных частиц в воздухе рабочей зоны цехов при увеличении количества частиц (рис. 3), что указывает на специфику пылевого загрязнения при каждом технологическом процессе.

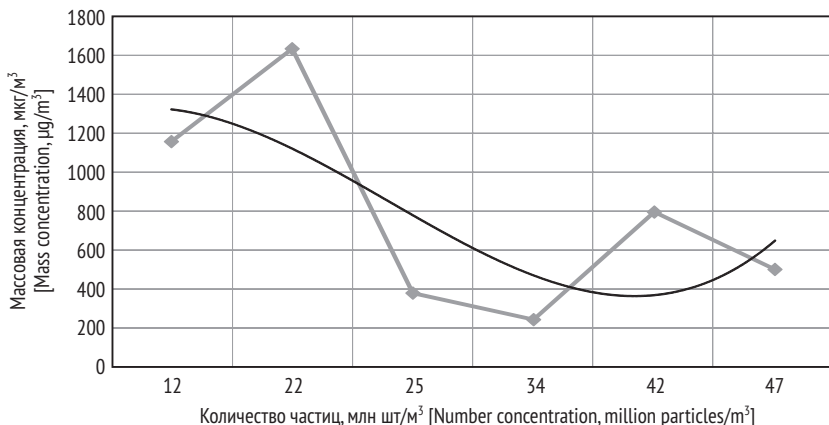


Рис. 3. Зависимость между массовой концентрацией и количеством частиц в воздухе рабочей зоны предприятий

Fig. 3. The dependence between the mass concentration and the number of particles in the workplaces air of plant

Анализ дисперсного состава частиц воздуха рабочей зоны в цехах предприятия по металлообработке показал, что наиболее распространенной фракцией являлись частицы с размером от 1 до 2,5 мкм, доля которых составила 50,88–54,76% (рис. 4). В наименьшем количестве в цехе литья были представлены крупные частицы диаметром более 10 мкм, а в цехе металлообработки – диаметром 0,3–0,5 мкм.

В воздухе рабочей зоны цехов предприятия по производству строительных материалов наибольшую долю также составили частицы размером 1–2,5 мкм, однако их доля была ниже в сравнении предприятием по металлообработке (рис. 5). Вторыми по вкладу на данном объекте являлись частицы диаметром от 0,5 до 1 мкм. Наименьшую долю в воздухе рабочей зоны цеха по производству блоков составили частицы диаметром более 10 мкм (0,39%), тогда как цеха по производству кирпича – диаметром 0,3–0,5 мкм (0,53%).

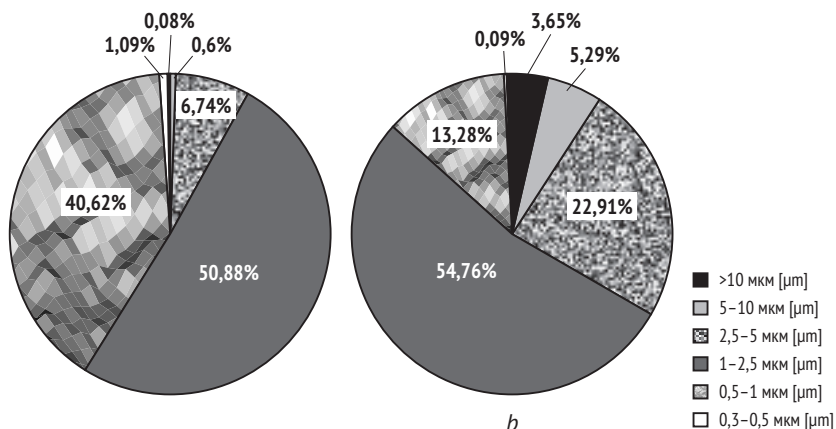


Рис. 4. Спектр размеров частиц в воздухе рабочей зоны предприятия по металлообработке:
a – цех производства блоков; *b* – цех производства кирпича

Fig. 4. Size spectra of particulate matter in the workplace air of metal working plant:
a – metal casting; *b* – metal processing

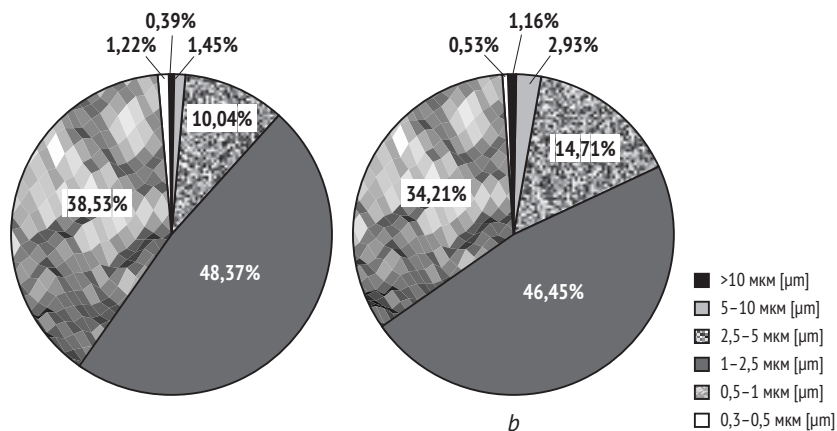


Рис. 5. Спектр размеров частиц в воздухе рабочей зоны предприятия по производству строительных материалов:
a – цех производства блоков; *b* – цех производства кирпича

Fig. 5. Size spectra of particulate matter in the workplace air of building materials plant:
a – metal casting; *b* – metal processing

На предприятии по обработке древесных материалов в воздухе рабочей зоны всех цехов наиболее многочисленными также были частицы с диаметром 1–2,5 мкм, доля которых составила около 52% (рис. 6). Встречаемость частиц с наименьшими размерами (0,3–0,5 мкм), которые наиболее сложно регистрировать при световой микроскопии препаратов, была минимальной в обоих цехах и составила 0,06–0,29%.

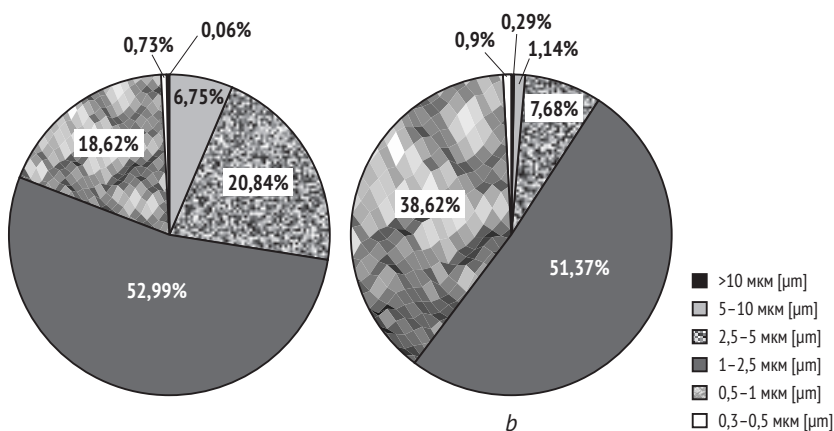


Рис. 6. Спектр размеров частиц в воздухе рабочей зоны предприятия по деревообработке:

a – цех прессования МДФ; *b* – цех фрезеровки МДФ

Fig. 6. Size spectra of particulate matter in the workplace air of woodworking plants:

a – MDF pressing; *b* – MDF milling

Кластеризация данных о фракционном составе взвешенных частиц в воздухе рабочей зоны различных цехов производственных предприятий показала, что их можно объединить в две группы (рис. 7). На древовидной гистограмме, полученной методом одиночной связи, видно, что по соотношению частиц разного гранулометрического состава один кластер составляют цех прессования и цех металлообработки, а остальные исследуемые цеха группируются во второй кластер, где наиболее близки оказались цех фрезеровки и цех литья. Цех по производству кирпича находится на наибольшем отдалении во второй группе, а цех по производству блоков занимает промежуточное положение.

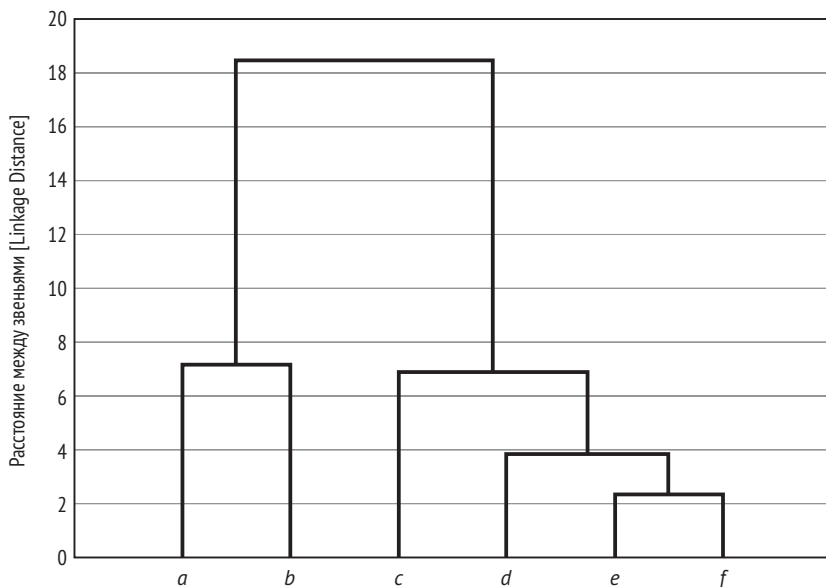


Рис. 7. Кластерная дендрограмма производственных процессов по размерным спектрам взвешенных частиц в воздухе рабочих мест:

a – прессование МДФ; *b* – металлообработка;
c – производство кирпича; *d* – производство блоков;
e – фрезеровка МДФ; *f* – литье металлов

Fig. 7. Cluster dendrogram of production processes by size spectra of particulate matter in the of workplace air:

a – MDF pressing; *b* – metal processing;
c – brick production; *d* – block production;
e – MDF milling; *f* – metal casting

Объединение данных методом *k*-средних показывает, что в распределение цехов предприятий на кластеры статистически значимый вклад ($p \leq 0,05$) внесли три фракции частиц (табл. 1). В первую очередь характер группировки цехов обусловлен количеством частиц диаметром 0,5–1 мкм, т.к. для них получено наибольшее достоверное значение *F*-критерия. Вторыми по значимости для кластеризации стали частицы размером от 5 до 10 мкм, третьими – пылевые частицы диаметром 2,5–5 мкм. По трем фракциям (более 10 мкм, 1–2,5 мкм, 0,3–0,5 мкм) доли частиц в рассматриваемых кластерах статистически не различаются, $p > 0,05$ (табл. 1, рис. 8).

Таблица 1

Описание групп производственных процессов по спектру частиц с разным диаметром в воздухе рабочей зоны предприятий
[Description of clusters of production processes by size spectra of particulate matter in the of workplace air]

Размеры частиц, мкм [Particle size, μm]	Среднее значение в кластере, % [Cluster Means, %]		Коэффициент Фишера [Fisher coefficient]	Уровень значимости p [Significance level p]
	Кластер 1 [Cluster 1]	Кластер 2 [Cluster 2]		
>10	1,855	0,480	1,418	0,299
5–10	6,020	1,530	26,554	0,007
2,5–5	21,875	9,793	19,385	0,012
1–2,5	53,875	49,265	6,533	0,063
0,5–1	15,950	37,995	71,696	0,001
0,3–0,5	0,410	0,935	3,093	0,153

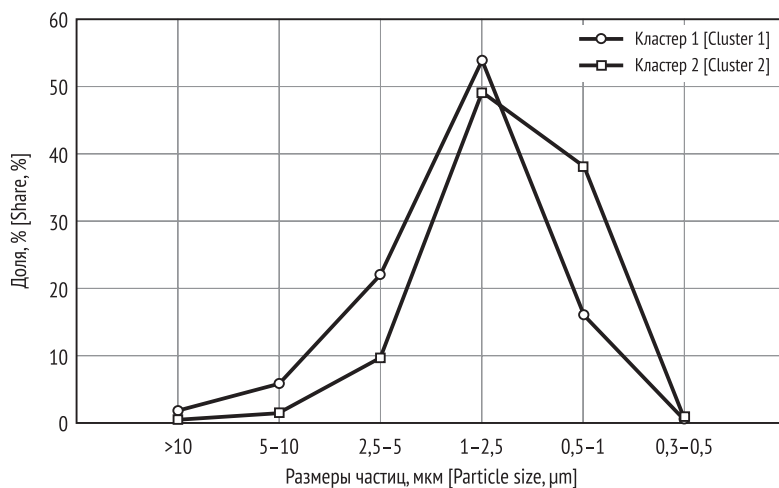


Рис. 8. Моделирование распределения частиц по размерам в воздухе рабочей зоны при объединении производственных процессов в два кластера

Fig. 8. Modelling particle size distribution in workplace air when combining production processes into two clusters

Таблица 2

Сводная статистика средних величин размеров частиц в воздухе рабочей зоны предприятий
[Summary statistics of average particle size in the workplace air of plants]

Статистические показатели [Statistic]	Производственные процессы [Production processes]					
	Литье металла [Metal casting]	Металлообработка [Metal processing]	Производство блоков [Block production]	Производство кирпича [Brick production]	Прессование МДФ [MDF pressing]	Фрезеровка МДФ [MDF milling]
Объем выборки, ед. [Valid, n]	4384	1585	1954	1796	1646	2162
Средняя арифметическая, мкм [Mean, μm]	1,55	5,32	2,32	3,26	2,17	1,90
Ошибка среднего значения, мкм [Std. error of mean, μm]	0,02	0,14	0,06	0,09	0,04	0,05
Точность определения средней арифметической, % [The accuracy of the arithmetic mean, %]	1,48	2,68	2,59	2,76	1,73	2,60
Доверительный (95%) интервал для генеральной средней, мкм [Confidence 95%, μm]	1,50–1,59	5,04–5,60	2,20–2,43	3,09–3,43	2,09–2,24	1,80–1,99
Медиана, мкм [Median, μm]	1,10	2,86	1,37	1,72	1,71	1,14
Мода, мкм [Mode, μm]	0,88	∞	1,1	1,1	1,10	0,97
Частота встречаемости моды [Frequency of Mode]	159	24	66	44	35	87

Таким образом, наблюдается значительное отличие массовой и числовой концентрации пылевых частиц для двух цехов одного и того же предприятия, особенно для предприятий металлообрабатывающей и деревообрабатывающей промышленности (см. рис. 1, 2). И если доля наиболее объемной фракции взвешенных частиц (1,0–2,5 мкм) в цехах одного и того же предприятия практически одинакова, то доли остальных фракций при этом различаются, особенно заметно это для цехов предприятия по металлообработке и для цехов предприятия по деревообработке. Для предприятия по производству строительных материалов спектры размеров частиц для двух цехов наиболее близки.

Результаты описательной статистической обработки данных в наблюдаемых выборках показали, что средний диаметр взвешенных частиц в воздухе рабочей зоны составил от 1,55 мкм в цехе литья до 5,32 мкм в цехе металлообработки (табл. 2). Во всех выборках, независимо от их объема, точность оценки средней составила менее 5%, что указывает на хороший уровень их репрезентативности при прогнозировании генеральных средних величин.

Для диаметра взвешенных частиц в пробах воздуха рабочей зоны цеха металлообработки были характерны значения размаха варьирования и дисперсии наибольшие, цеха фрезеровки – наименьшие (табл. 3). Оценка относительной изменчивости на основе коэффициента вариации показала, что размер частиц в воздухе рабочей зоны цехов литья и фрезеровки имеет очень высокую вариабельность по отношению к среднему значению, а остальных цехов – аномальную вариабельность. Все шесть рассматриваемых статистических совокупностей можно считать неоднородными.

Результаты численной оценки соответствия распределения наблюдаемых величин нормальному закону с помощью коэффициентов асимметрии и эксцесса представлены в табл. 4. Установлено, что во всех отобранных выборках коэффициенты Стьюдента значительно больше 3, следовательно, величины асимметрии и эксцесса статистически значимы, и при дальнейшем статистическом анализе данных предпочтительно применение непараметрических методов. Кривые распределения характеризуются правосторонней асимметрией и являются островершинными.

Попарное сравнение медианных значений в выборках с помощью теста Манна–Уитни показало, что самые существенные статистически значимые различия в размерах взвешенных частиц наблюдаются между цехами литья и металлообработки, наименее существенные – между цехами литья и производства блоков. В цехах производства кирпича и прессования изделий из МДФ, а также цехов производства блоков и фрезеровки диаметр частиц статистически не различается (табл. 5).

Таблица 3

Сводная статистика вариации размера частиц в воздухе рабочей зоны предприятий
[Summary statistics of particle size variation in the air of the working area of enterprises]

Статистические показатели [Statistic]	Производственные процессы [Production processes]					
	Литье металла [Metal casting]	Металлообработка [Metal processing]	Производство блоков [Block production]	Производство кирпича [Brick production]	Прессование МДФ [MDF pressing]	Фрезеровка МДФ [MDF milling]
Минимум, мкм [Minimum, μm]	0,31	0,42	0,35	0,48	0,31	0,40
Максимум, мкм [Maximum, μm]	18,58	49,09	23,01	35,48	25,29	11,76
Размах варьирования, мкм [Range, μm]	18,27	48,67	22,66	35,00	24,98	11,36
Первый квартиль, мкм [Lower Quartile, μm]	0,84	1,41	1,01	1,10	0,88	1,10
Третий квартиль, мкм [Upper Quartile, μm]	1,54	7,29	2,27	3,76	1,72	2,69
Интерквартильный размах, мкм [Quartile Range, μm]	0,70	5,88	1,26	2,66	0,84	1,59
Стандартное отклонение, мкм [Standard deviation, μm]	1,52	5,68	2,59	3,73	2,29	1,52
Коэффициент вариации, % [Coefficient of variation, %]	98,02	106,87	111,85	114,38	120,91	70,29

**Статистический анализ формы вариационных рядов размеров частиц
в воздухе рабочей зоны предприятий**
[Statistical analysis of the shape of the variation series of particle sizes
in the air of the working area of enterprises]

Статистические показатели [Statistic]	Производственные процессы [Production processes]					
	Литье металла [Metal casting]	Металлообработка [Metal processing]	Производство блоков [Block production]	Производство кирпича [Brick production]	Прессование МДФ [MDF pressing]	Фрезеровка МДФ [MDF milling]
Асимметрия [Skewness]	4,10	2,27	3,46	2,87	1,71	4,13
Ошибка асимметрии [Std. err. of skewness]	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05
Коэффициент Стьюдента [Student coefficient]	110,77	36,98	57,67	47,83	28,27	78,48
Эксцесс [Kurtosis]	21,71	7,37	15,64	11,50	3,22	23,27
Ошибка эксцесса [Std. err. of kurtosis]	0,07	0,12	0,11	0,12	0,12	0,11
Коэффициент Стьюдента [Student coefficient]	293,65	59,97	142,18	95,83	26,75	221,10

Таблица 5

**Результаты теста Манна–Уитни при сравнении размера частиц
в воздухе рабочей зоны цехов предприятий**
[Result from Mann –Whitney test on comparing the particle size in the workplace air of plants]

Производственные процессы [Production processes]	Z-критерий [Z-score]					
	Литье металла [Metal casting]	Металлообработка [Metal processing]	Производство блоков [Block production]	Производство кирпича [Brick production]	Прессование МДФ [MDF pressing]	Фрезеровка МДФ [MDF milling]
Литье металла [Metal casting]		-36,27*	-8,12*	-20,73*	-21,63*	-9,18*
Металлообработка [Metal processing]	36,27*		28,76*	17,23*	17,87*	26,67*
Производство блоков [Block production]	8,12*	-28,76*		-12,57*	-12,84*	-1,76
Производство кирпича [Brick production]	20,73*	-17,23*	12,57*		0,22	10,00*
Прессование МДФ [MDF pressing]	21,63*	-17,87*	12,84*	-0,22		12,04*
Фрезеровка МДФ [MDF milling]	9,18*	-26,67*	-1,76	-10,00*	-12,04*	

Примечание: * $p < 0,05$.

[Note: * $p < 0,05$.]

Заключение

Таким образом, массовая концентрация и количество взвешенных частиц в воздухе рабочей зоны предприятий зависит от вида выпускаемой продукции и технологического процесса. Максимальная массовая концентрация твердых частиц выявлена в воздухе при фрезеровке МДФ, тогда как максимальное количество частиц – при литье металлических изделий и прессовании изделий из МДФ. Можно утверждать, что каждый из шести исследованных цехов специфичен как по массовой и числовой концентрации взвешенных частиц, так и по спектру размеров частиц. Поэтому кластеризация данных по спектру частиц показала, что в один кластер вошли цех прессования и цех металлообработки, а также из второго кластера наиболее близки оказались цех фрезеровки и цех литья, т.е. цеха предприятий разных отраслей промышленности.

Установлено, что частицы размерами 1–2,5 мкм являются наиболее распространенной фракцией в воздухе при производстве кирпичей и блоков, прессовании и фрезеровке изделий из МДФ, литье и обработке металлических изделий. Выявлено, что отличия фракционного состава взвешенных частиц в воздухе при различных производственных процессах на предприятиях металлообрабатывающей, деревообрабатывающей и строительной промышленности обусловлены прежде всего количеством частиц с диаметром 0,5–1 и 5–10 мкм.

Наиболее статистически значимые и существенные различия в размерах пылевидных частиц получены между цехами литья и металлообработки (т.е. цехами одного и того же предприятия), наименее существенные – между цехами литья и производства блоков (т.е. цехами предприятий разных отраслей промышленности). Это указывает на сложность прогнозирования дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны разных цехов и разных предприятий. Важен дисперсный анализ взвешенных частиц для каждого отдельно взятого рабочего места.

Приведенные исследования могут быть использованы для разработки нормативов предельно допустимых концентраций мелкодисперсных фракций взвешенных частиц при оценке условий труда и профессионального риска при конкретных технологических процессах.

Библиографический список / References

Боровиков В.П., Боровиков И.П. Статистический анализ и обработка данных в среде Windows. М., 1998. [Borovikov V.P., Borovikov I.P. Statisticheskii analiz i obrabotka dannykh v srede Windows [Statistical analysis and data processing in the Windows environment]. Moscow, 1998.]

Жукова А.А., Минец М.Л. Биометрия: В 3 ч. Ч. 1. Описательная статистика. Мн., 2019. [Zhukova A.A., Minec M.L. Biometriya [Biometrics]: In 3 vols. Vol. 3. Descriptive statistics. Minsk, 2019.]

Исследования наноразмерных частиц в составе промышленных аэрозолей и взвешенных веществ в воздухе рабочей зоны / Зайцева Н.В., Уланова Т.С., Злобина А.В. и др. // Токсикологический вестник. 2017. № 1. С. 20–26. [Zaitseva N.V., Ulanova T.S., Zlobina A.V. et al. Investigation into nanoscale particles as part of industrial aerosols and particulate matter in the air of working area. *Toxicological Review*. 2017. Vol. 1. Pp. 20–26. (In Rus.)]

Механизм патологического действия многослойных углеродных нанотрубок с различным уровнем металлических примесей / Виткина Т.И., Янькова В.И., Гвозденко Т.А. и др. // Сибирский научный медицинский журнал. 2017. Т. 37. № 2. С. 5–11. [Vitkina T.I., Yankova V.I., Gvozdenko T.A. et al. Mechanisms of pathological effect of multilayer carbon nanotubes with different levels of metallic impurities. *Siberian Scientific Medical Journal*. 2017. Vol. 37. No. 2. Pp. 5–11. (In Rus.)]

Ответная реакция системы «перекисное окисление липидов – антиоксидантная защита» на комплексное воздействие природно-экологических факторов при заболеваниях органов дыхания / Янькова В.И., Веремчук Л.В., Виткина Т.И. и др. // Сибирский научный медицинский журнал. 2016. Т. 36. № 3. С. 94–102. [Yankova V.I., Veremchuk L.V., Vitkina T.I. et al. The response of the lipid peroxidation – antioxidant protection system on the complex impact of the environmental factors in respiratory diseases. *Siberian Scientific Medical Journal*. 2016. Vol. 36. No. 3. Pp. 94–102. (In Rus.)]

Световая микроскопия в оценке мелкодисперсных фракций взвешенных частиц в атмосферном воздухе городской среды / Колесник И.М., Юхневич Г.Г., Белова Е.А. и др. // Вестник ГрГУ. Серия 6. Техника. 2022. Т. 12. № 1. С. 36–50. [Kolesnik I.M., Yukhnevich G.G., Belova E.A. et al. Optical light microscopy in the determination of small fractions of suspended particles in the air of the urban environment. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*. Vol. 12. 2022. No. 1. Pp. 36–50. (In Rus.)]

Уланова Т.С., Гилева О.В., Волкова М.В. Определение частиц микро- и нанодиапазона в воздухе рабочей зоны на предприятиях горнодобывающей промышленности // Анализ риска здоровью. 2015. № 4. С. 44–48. [Ulanova T.S., Gileva O.V., Volkova M.V. Determination of micro- and nanoparticles in the workplace area at the enterprises of mining industry. *Health Risk Analysis*. 2015. No. 4. Pp. 44–49. (In Rus.)]

Чомаева М.Н. Промышленная пыль как вредный производственный фактор // Национальная безопасность и стратегическое планирование. 2015. № 2 (10). С. 119–122. [Chomaeva M.N. Industrial dust as harmful factors. *National Security and Strategic Planning*. 2022. No. 2 (10). Pp. 119–122. (In Rus.)]

Янин Е.П. Промышленная пыль (разновидности, источники, химический состав) // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2004. № 6. С. 2–107. [Yanin E.P. Industrial dust (varieties, sources, chemical composition). *Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection*. 2004. No. 6. Pp. 2–107. (In Rus.)]

Amoatey P., Sicard P., De Marco A. et al. Long-term exposure to ambient PM_{2.5} and impacts on health in Rome, Italy. *Clin. Epidemiol. Glob. Health.* 2020. No. 8. Pp. 531–535.

Chen G., Li S., Zhang Y. et al. Effects of ambient PM₁ air pollution on daily emergency hospital visits in China: An epidemiological study. *The Lancet Planetary Health.* 2017. No. 1. Pp. 221–229.

Mangia C., Cervino M., Russo A. et al. Effectiveness of an air quality intervention: An accountability study in a highly polluted industrial town. *Air Qual. Atmos. Health.* 2020. Vol. 13. Pp. 289–296.

Mate T., Guaita R., Pichiule M. et al. Short-term effect of fine particulate matter (PM_{2.5}) on daily mortality due to diseases of the circulatory system in Madrid (Spain). *Sci. Total Environ.* 2010. Vol. 408. Pp. 5750–5757.

Vitkina T.I., Yankova V.I, Gvozdenko T.A. et al. The impact of multi-walled carbon nanotubes with different amount of metallic impurities on immunometabolic parameters in healthy volunteers. *Food and Chemical Toxicology.* 2016. Vol. 87. Pp. 138–147.

Yorifuji T., Kashima S., Doi H. Associations of acute exposure to fine and coarse particulate matter and mortality among older people in Tokyo, Japan. *Sci. Total Environ.* 2016. Vol. 542. Pp. 354–359.

Статья поступила в редакцию 13.02.2023, принята к публикации 05.05.2023
The article was received on 13.02.2023, accepted for publication 05.05.2023

Сведения об авторах / About the authors

Колесник Ирина Михайловна – магистр биологических наук; старший преподаватель кафедры экологии, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Беларусь

Iryna M. Kalesnik – MA (Biology); teacher at the Department of Ecology, Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5365-4751>

E-mail: i.kolesnik@grsu.by

Белова Екатерина Александровна – старший преподаватель кафедры экологии, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Беларусь

Katerina A. Belova – teacher at the Department of Ecology, Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus

E-mail: belova_ea@grsu.by

Юхневич Галина Геннадьевна – кандидат биологических наук, доцент; заведующий кафедрой экологии, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Беларусь

Halina G. Yukhnevich – Ph.D. (Biology); Head at the Department of Ecology, Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus

E-mail: guhnev@grsu.by

Заявленный вклад авторов

И.М. Колесник – обработка данных, анализ и интерпретация результатов обработки данных, подготовка текста статьи

Е.А. Белова – анализ и интерпретация результатов обработки данных, участие в подготовке текста статьи

Г.Г. Юхневич – общее руководство направлением исследования, участие в подготовке текста статьи

Contribution of the authors

I.M. Kolesnik – data processing, analysis and interpretation of data processing results, preparation of the article text

E.A. Belova – analysis and interpretation of data processing results, participation in the preparation of the text of the article

G.G. Yukhnevich – general management of the research direction, participation in the preparation of the text of the article

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript