

СТАТЬИ

УДК 613.6

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГИГИЕНИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ РИСКА ЗДОРОВЬЮ РАБОТНИКОВ ПЫЛЕВЫХ ПРОФЕССИЙ

¹Егорова А.М., ¹Луценко Л.А., ²Федорович Г.В., ¹Сухова А.В.

¹ФБУН «Федеральный научный центр гигиены им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, Мытищи, e-mail: egorovaam@fferisman.ru;

²ООО «НТМ-защита», Москва

Пылевой фактор сохраняет приоритетное значение среди факторов риска здоровью работников пылевых профессий, занятых в ведущих отраслях промышленности. Высокий уровень профессиональных и производственно обусловленных заболеваний вследствие интенсивного воздействия пылевого фактора требует применения дополнительных информативных показателей, характеризующих поведение вдыхаемых пылевых частиц на участках дыхательного тракта, для своевременного прогнозирования рисков нарушений здоровья и персонализированного осуществления мер защиты здоровья лиц «пылевых» профессий. Более детальное знание пылевой экспозиции способствует конкретизации степени опасности пылевой нагрузки как этиологического фактора нарушений здоровья работников, имеющих разную степень опасности и вредности условий труда по пылевому фактору. Выполнена систематизация имеющихся материалов по взаимосвязи концентраций аэрозолей, загрязняющих воздух рабочей зоны, с развитием неблагоприятных последствий здоровью работников «пылевых» профессий. Дана оценка способности пылевых частиц, отлагаемых на участках трахеобронхиального дерева, к накоплению, выведению и участию в формировании накопленной массы пыли как информативного показателя при расчете и регулировании пылевой нагрузки в легких работников пылевых профессий. Для уточнения экспозиции вдыхаемой массы пыли рассмотрены особенности поведения пылевых частиц в дыхательном тракте работников «пылевых» профессий; показатели количественной оценки процесса мукоцилиарной очистки легких от частиц различного размера; сформулированы предложения к уточнению критериев гигиенической оценки пылевого фактора с учетом дисперсности вдыхаемых частиц и их поведения в дыхательных путях человека.

Ключевые слова: пыль, профессиональный риск здоровью, гигиеническое нормирование аэрозолей, вдыхаемые фракции, накопленная масса пыли в легочной ткани

IMPROVEMENT OF HYGIENE CRITERIA FOR ASSESSING THE HEALTH RISK OF WORKERS IN DUST PROFESSIONS

¹Egorova A.M., ¹Lutsenko L.A., ²Fedorovich G.V., ¹Sukhova A.V.

¹FBES FSCH named after F.F. Erisman of the Rospotrebnadzor, Mytitschi, e-mail: egorovaam@fferisman.ru;

²NTM-Zaschita, Moscow

The dust factor remains a priority among health risk factors for dust workers employed in leading industries. The high level of occupational and occupational diseases due to the intensive exposure to the dust factor requires the use of additional informative indicators characterizing the behavior of inhaled dust particles in the respiratory tract, for the timely prediction of the risks of health disorders and the personalized implementation of health protection measures for persons of «dust» professions. A more detailed knowledge of dust exposure contributes to the specification of the degree of danger of dust load as an etiological factor in health disorders of workers with different degrees of hazard and harmfulness of working conditions in terms of the dust factor. The systematization of available materials on the relationship of the concentrations of aerosols that pollute the air of the working area with the development of adverse health effects of workers in the «dusty» professions has been carried out. An assessment is given of the possibility of dust particles deposited in areas of the tracheobronchial tree to accumulate, remove and participate in the formation of the accumulated mass of dust, as an informative indicator for calculating and regulating the dust load in the lungs of workers in dusty professions. To clarify the exposure of the inhaled dust mass, the features of the behavior of dust particles in the respiratory tract of workers in the «dust» professions are considered; indicators of quantitative assessment of the process of mucociliary purification of the lungs from particles of various sizes; proposals have been formulated to clarify the criteria for the hygienic assessment of the dust factor, taking into account the dispersion of inhaled particles and their behavior in the human respiratory tract.

Keywords: dust, occupational health risk, hygienic regulation of aerosols, respirable fractions, accumulated mass of dust in the lung tissue

Профессиональные заболевания от воздействия промышленных аэрозолей занимают одно из ведущих мест в общей структуре профессиональной заболеваемости работающего населения. При этом на долю пневмокониозов вследствие воздействия кремнеземсодержащей пыли приходится

25,87%, хронических пылевых бронхитов – 17,63% [1]. Наиболее неблагоприятные условия труда по пылевому фактору фиксируются у подземных горнорабочих очистных забоев, проходчиков, забойщиков, бурильщиков, скреперистов, машинистов погружных и буровых машин и др. [2].

Цель исследования – совершенствование гигиенических критериев опасности воздействия промышленного аэрозоля.

Материалы и методы исследования

Проведен анализ результатов отечественных и международных исследований, связанных с гигиенической оценкой пылевого фактора и изучением его действия на здоровье работающих.

Результаты исследования и их обсуждение

В условиях промышленных производств неблагоприятное воздействие аэрозолей на здоровье работников, как правило, оценивают по массовой концентрации пылевых частиц в воздухе рабочей зоны, без дифференциации её по фракционному составу, соответствующему различным областям осаждения твердых пылевых частиц в респираторной системе человека.

Знание только массовой концентрации не обеспечивает выявления соответствующих рисков здоровью работающих и населения, связанных с вдыханием аэрозолей. Так, согласно исследованиям [3], некоторые особенно мелкие вдыхаемые нерастворимые частицы могут быть токсичнее, чем более крупные частицы аналогичного состава. Результаты исследований свидетельствуют, что более информативным показателем воздействия частиц на организм при их вдыхании является не общее число или линейные размеры, а площадь поверхности частиц [3].

В исследовании [4] предложена цифровая анатомическая модель, иллюстрирующая накопление ультрамелких частиц по всей схеме ветвления легкого человека. Численная модель была применена для ультрамелких частиц диаметром от $1 \leq nm \leq 1000$ для различных физических состояний: сна, отдыха и легкой активности. Установлено, что процентное распределение общей скорости потока в правом легком примерно в 1,5 раза выше, чем в левом легком, скорость потока в нижних долях правого и левого легкого выше, чем в других долях. Частицы диаметром ≤ 10 нм осаждаются в трахеобронхиальных дыхательных путях. Напротив, частицы диаметром более 10 нм откладываются на концевых бронхиолах анатомической модели.

В статье [5] проведена оценка токсичности различных источников $PM_{2.5}$: выхлопные газы дизельных и бензиновых двигателей, сжигание биомассы с использованием многокритериального подхода.

Исследование [6] позволило охарактеризовать аэрозоль, образующийся в процес-

се электродугового и пламенно-термического напыления – полностью субмикронный аэрозоль с фракцией ультрамелких частиц (диаметром <100 нм) 80–95% в численном выражении. Высокие уровни выбросов были зарегистрированы при электродуговом напылении, в частности с использованием чистого алюминия, и эти значения намного выше, чем, например, при дуговой сварке. Концентрации $>10^8$ частиц (диаметр ≥ 28 нм) $см^{-3}$ были зарегистрированы в вентилируемых кабинах, в которых выполняются операции электродугового напыления. При таких высоких концентрациях частиц (10^8 – 10^9 $см^{-3}$) аэрозоль очень нестабилен из-за коагуляции.

В исследовании [7] проведена оценка профессионального риска для здоровья, связанного с угольной пылью. Установлено, что концентрация угольной пыли на передаточной башне, самосвале, судовом погрузчике и на площадке для хранения угля была выше, чем на других рабочих местах. 78,6% постов находились на «недопустимом» уровне профессионального риска.

В статье [8] представлены результаты измерений распределения размеров аэрозолей в диапазоне от нескольких нанометров до 20 мкм в подземных выработках каменноугольной шахты. В исследовании были включены практически все частицы вдыхаемой фракции. Результаты показали, что высокая концентрация мелкодисперсных и ультратонких аэрозолей наблюдается на ведущих рабочих местах подземных профессий горнорабочих, особенно во время работы горных машин, хотя их вклад в концентрацию общей массы пыли обычно незначителен.

В статье [9] изучалось воздействие сварочного аэрозоля из нержавеющей стали, содержащего токсичные тяжелые металлы: хром (Cr), марганец (Mn) и никель (Ni). Вблизи зоны дыхания числовое распределение было мультимодальным, находилось в диапазоне 10–30 нм.

Факторами, определяющими опасность воздействия пылевого фактора на здоровье работников пылевых профессий, являются: вещественный состав компонентов, интенсивность воздействия общей массы пыли, витающей в воздухе рабочей зоны, $мг/м^3$; размер частиц (дисперсность), плотность (удельный вес), растворимость, объем дыхания в зависимости от тяжести труда, индивидуальная чувствительность организма [10].

Проведено исследование функционального состояния и профессиональной заболеваемости у рабочих при воздействии

ультрамелких частиц искусственной каменной пыли [11]. Ингаляция высоких доз ультрамелких частиц пыли на рабочих местах (резка и шлифовка плит при производстве кухонных столешниц, ванн и раковин) привела к повышению воспалительных цитокинов у рабочих, высокому проценту развития силикоза при стаже более 20 лет.

При длительном пылевом воздействии малорастворимой пыли защитный механизм слизистой оболочки верхних дыхательных путей (ВДП) ослабевает, что способствует проникновению пылевых частиц – в том числе крупнодисперсной фракции – из верхних дыхательных путей в более глубокие дыхательные пути и легкие [12].

Созданы кривые проникновения и отложения частиц пыли в респираторном тракте человека; фракцию пыли 0,25–0,5 мкм стали считать респирательной и самой опасной. Для характеристики фракционного состава вдыхаемого аэрозоля введено понятие «вдыхаемая фракция», как массовая доля всех взвешенных в воздухе частиц, которые вдыхаются через нос или рот [13].

В исследовании [14] изучали вдыхаемый кристаллический диоксид кремния, являющийся канцерогеном. Это исследование было проведено среди 236 литейщиков на Тайване. Были созданы модели прогнозирования персонализированного воздействия диоксида кремния. Пробы пыли различных производственных процессов были измерены гравиметрическим методом и проанализированы с использованием метода дифракции рентгеновских лучей. Самые высокие уровни воздействия наблюдались среди рабочих в процессе пескоструйной обработки. Разработанные модели прогнозируемого воздействия вдыхаемой пыли могут быть применены для адекватного прогнозирования уровней вдыхаемой пыли у рабочих небольших литейных производств при выполнении эпидемиологических исследований.

Воздействие вдыхаемых частиц кристаллической двуокиси кремния на рабочем месте происходит во многих отраслях промышленности и может привести к тяжелому осложнению – силикозу. Фагоцитоз кристаллического кремнезема в легких вызывает лизосомное повреждение, активируя инфламмасому и запуская воспалительный каскад с последующим фиброзом [15].

Исследование [16] направлено на изучение профессионального воздействия кристаллической кремнеземной пыли на 22 заводах в Египте, занимающихся различными видами промышленной деятельности, такими как резка камня, изготовление стекла, керамика и пескоструйная обработка.

На рабочих участках образцы пыли были отобраны в зоне дыхания работника с помощью персонального насоса для отбора проб и циклона выборочного размера и проанализированы. Результаты показывают, что уровни пылевого воздействия в каждом из промышленных секторов намного выше, чем действующие национальные и международные нормативы, и это приводит к высокому риску рака легких и смертности рабочих.

Основой описания фракционного состава аэрозолей в воздухе послужили теоретические знания статистической теории дробления [17] и разработанная [18] динамическая модель (в виде цепи Маркова), описывающая распределение числа частиц по размерам; исследование процессов осаждения аэрозольных частиц на стенки трахеобронхиального дерева [19].

Предложена модель [20–21], уточняющая механизм очистки трахеобронхиального дерева (ТБД) с использованием двух важнейших показателей: скорости производства и скорости эскалации трахеобронхиального секрета (ТБС) в различных отделах трахеобронхиального дерева. Разработанная модель [20–21] процесса депонирования аэрозольных частиц при периодическом (во время рабочей смены) вдыхании запыленного воздуха позволяет определить количество депонированных частиц в зависимости от величины концентраций аэрозоля в воздухе рабочей зоны, интенсивности легочного воздухообмена, режимов труда и отдыха.

Согласно расчетам [22], для частиц размером более 10 мкм вероятность достичь глубоких отделов легких практически равна нулю, так как в результате инерционного механизма очистки они захватываются в верхних дыхательных путях: трахее, зональных внелегочных бронхах, внутрилегочных субсегментарных бронхах.

В статье [23] представлен метод, основанный на позитронно-эмиссионной томографии, который на реалистичной модели легких человека позволяет получить подробные экспериментальные данные о локальном осаждении аэрозолей. В методе используется конденсационный монодисперсный генератор аэрозолей, модифицированный для безопасного получения радиоактивных аэрозольных частиц, и специальная измерительная установка. Сканирование модели производится на сканере позитронно-эмиссионной томографии – компьютерной томографии. Оценка осаждения аэрозолей основана на анализе объемной радиоактивности в специализированном, но общедоступном программном обеспечении.

Выводы

Полученные результаты позволили конкретизировать степень опасности и вредности условий труда работников по пылевому фактору с целью обоснования более эффективных мер защиты здоровья работников «пылевых» профессий. Показана необходимость исследования дисперсности пылевых частиц воздушной среды, их роли в формировании вредного воздействия пылевого фактора на организм работников пылевых профессий; обоснован выбор площади поверхности депонированных в легких частиц аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД), как возможного показателя, уточняющего информативность результатов расчета пылевой нагрузки при оценке риска воздействия пылевого фактора. Тем самым понятие «пылевая нагрузка» получит важную конкретизацию гигиенически значимых её составляющих. При нормировании пылевой нагрузки и планировании мероприятий по «защите временем» работников «пылевых» профессий необходимо учитывать не только массу пыли во вдыхаемом воздухе, дисперсный состав витающей и вдыхаемой пыли, но и структуру цикла: длительность работы при вдыхании запыленного воздуха и время перерыва между рабочими сменами.

Проблема выбора информативных критериев оценки вредного воздействия пылевых частиц, витающих в воздухе рабочей зоны, на здоровье работающих, остается актуальной задачей и требует реализации более эффективных мер профилактики.

В России метод контроля концентраций аэрозолей преимущественно фиброгенного действия (АПФД) предназначен для определения общей массы витающих в воздухе рабочей зоны пылевых частиц, учитывает класс вредности и/или опасности условий труда по кратности превышения предельно допустимых (максимально разовых и/или среднесменных) концентраций (ПДК) промышленных аэрозолей в воздухе рабочей зоны. Такие показатели позволяют оценить пылевую экспозицию только по суммарной величине воздействия, поскольку основаны на знании среднесменных и/или максимально разовых концентраций, длительности воздействия, расчете величины пылевой нагрузки.

Однако для прогноза вредного воздействия промышленного аэрозоля на здоровье работников «пылевых» профессий информативным будет комплексный учет ряда показателей, включая знание специфики аэрозоля по происхождению, физико-химическому составу, параметрам растворимости

в разных диапазонах pH среды и др. Особенно важно знание фракционного состава витающей в воздухе рабочей зоны пыли, расчет её вдыхаемой доли; учет конкретных зон локализации пылевых частиц на определенных участках дыхательных путей человека и их способности к выведению, либо к длительной задержке.

Совершенствование методологии оценки гигиенически значимых характеристик пылевого воздействия позволяет уточнить поведение пылевых частиц в дыхательном тракте работников «пылевых» профессий и оценить особенности формирования накопленной массы пыли в легочной ткани; способствует конкретизации гигиенических критериев опасности и вредности условий труда по пылевому фактору и обоснованию более эффективных мер защиты здоровья работников, занятых при пылеобразующих технологических процессах.

Список литературы

1. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2017 г.: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав и благополучия человека, 2018. 268 с.
2. Ткачев В.В. Оценка риска профессиональных заболеваний пылевой этиологии // Профессиональный риск для здоровья работников (Руководство) / Под ред. Н.Ф. Измерова и Э.И. Денисова. М.: Тривант, 2003. 448 с.
3. Brown D.M., Wilson M.R., MacNee, W., Stone V., Donaldson K. Size-dependent proinflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: A role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2001. Vol. 175 (3). P. 191–199.
4. Islam M.S., Saha S.C., Sauret E., Gemci T., Yang I.A., Gu Y.T. Ultrafine particle transport and deposition in a large scale 17-generation lung model. *J. Biomech.* 2017 Nov 7. Vol. 64. P. 16–25. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2017.08.028. Epub. 2017 Sep 5. PMID: 28916396.
5. Kim I., Park K., Lee K., Park M., Lim H., Shin H., Kim S.D. Application of various cytotoxic endpoints for the toxicity prioritization of fine dust (PM_{2.5}) sources using a multi-criteria decision-making approach. *Environ Geochem Health.* 2020 Jun. Vol. 42 (6). P. 1775–1788. DOI: 10.1007/s10653-019-00469-2. Epub. 2019 Nov. 16. PMID: 31734831.
6. Bémer D., Régnier R., Subra I., Sutter B., Lecler M.T., Morele Y. Ultrafine particles emitted by flame and electric arc guns for thermal spraying of metals. *Ann Occup Hyg.* 2010 Aug. Vol. 54(6). P. 607–614. DOI: 10.1093/annhyg/meq052. Epub 2010 Aug 4. PMID: 20685717.
7. Han F., Zhang S., Wu B., Kang N., Chen Y. [Risk assessment of occupational health effect of coal dust in coal wharf]. *Wei Sheng Yan Jiu.* 2017 Mar. Vol. 46(2). P. 282–290. Chinese. PMID: 29903108.
8. Skubacz K., Wojtecki Ł., Urban P. Aerosol concentration and particle size distributions in underground excavations of a hard coal mine. *Int. J. Occup Saf Ergon.* 2017 Sep. Vol. 23(3). P. 318–327. DOI: 10.1080/10803548.2016.1198553. Epub. 2016 Jul. 8. PMID: 27309800.
9. Miettinen M., Torvela T., Leskinen J.T. Physicochemical Characterization of Aerosol Generated in the Gas Tungsten Arc Welding of Stainless Steel. *Ann Occup Hyg.* 2016 Oct. Vol. 60(8). P. 960–968. DOI: 10.1093/annhyg/mew039. Epub. 2016 Jul. 7. PMID: 27390355.

10. Sebastien P., Begin R. Этиопатогенез пневмокониозов // Энциклопедия по безопасности и гигиене труда. М., 2001. Т. 3. С. 190.
11. Ophir N., Bar Shai A., Korenstein R., Kramer M.R., Fireman E. Functional, inflammatory and interstitial impairment due to artificial stone dust ultrafine particles exposure. *Occup Environ Med.* 2019 Dec. Vol. 76(12). P. 875–879. DOI: 10.1136/oemed-2019-105711. Epub. 2019 Sep. 27. PMID: 31562234; PMCID: PMC6902064.
12. Борисенкова Р.В., Махотин Г.И. Труд и здоровье горнорабочих. М., 2001. 316 с.
13. Всемирная организация здравоохранения. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. WHO Regional Office for Europe, 2013.
14. Kuo C.T., Chiu F.F., Bao B.Y., Chang T.Y. Determination and Prediction of Respirable Dust and Crystalline-Free Silica in the Taiwanese Foundry Industry. *Int. J. Environ Res Public Health.* 2018 Sep. 25. Vol. 15(10):2105. DOI: 10.3390/ijerph15102105. PMID: 30257469; PMCID: PMC6210212.
15. Leung C.C., Yu I.T., Chen W. Silicosis. *Lancet.* 2012 May 26. Vol. 379(9830). P. 2008–2018. DOI: 10.1016/S0140-6736(12)60235-9. Epub. 2012 Apr. 24. PMID: 22534002.
16. Mohamed S.H., El-Ansary A.L., El-Aziz E.M.A. Determination of crystalline silica in respirable dust upon occupational exposure for Egyptian workers. *Ind Health.* 2018 Jun. 1. Vol. 56(3). P. 255–263. DOI: 10.2486/indhealth.2016-0192. Epub. 2017 Dec. 2. PMID: 29199263; PMCID: PMC5985465.
17. Колмогоров А.Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении. *ДАН СССР.* 1941. Т. 31. № 2. С. 99–101.
18. Hori M., Uchida M. Application of the theory of Markov processes to comminuting. P. 1. The case of discrete time parameter // *KodaiMath.Sem.Rep.* 1967. Vol. 19. P. 174–188.
19. Sanchez-Crespo A. Lung Scintigraphy in the Assessment of Aerosol Deposition and Clearance. *Semin Nucl Med.* 2019 Jan. Vol. 49 (1). P. 47–57. DOI: 10.1053/j.semnuclmed.2018.10.015. Epub. 2018 Nov. 22. PMID: 30545517.
20. Федорович Г.В. Роль инерционного механизма в процессе очистки воздуха в легких от аэрозольных частиц // *Пульмонология.* 2013. № 13 (вып. 2). С. 114–118.
21. Федорович Г.В. Модель мукоцилиарной очистки легких // *Пульмонология.* 2016. № 26 (вып. 2). С. 222–230.
22. Федорович Г.В. Рациональная диагностика профессиональных заболеваний. Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing, 2019. 304 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://my.palmarium-publishing.ru> (дата обращения: 23.08.2020).
23. Frantisek Lizal, Miloslav Belka, Jan Adam, Jan Jeldsky, Miroslav Jicha. A method for in vitro regional aerosol deposition measurement in a model of the human tracheobronchial tree by the positron emission tomography. *Journal of Engineering in Medicine.* 2015. Vol. 229 Issue 10. P. 750–757. DOI: 10.1177/0954411915600005.