

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2021

Егорова А.М.<sup>1</sup>, Луценко Л.А.<sup>1</sup>, Сухова А.В.<sup>1</sup>, Колюка В.В.<sup>1</sup>, Федорович Г.В.<sup>2</sup>

## К вопросу оценки профессионального риска заболеваний пылевой этиологии

<sup>1</sup>ФБУН «Федеральный научный центр гигиены имени Ф.Ф. Эрисмана» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 141014, Мытищи, Московская область, Россия;

<sup>2</sup>ООО «НТМ-Защита», 115230, Москва, Россия

**Введение.** В России профессиональные заболевания, связанные с воздействием промышленных аэрозолей (ПА), занимают 3-е место в структуре профессиональной патологии. Преобладающими формами профессиональных заболеваний являются хронический пылевой бронхит, пневмокозиоз (силикоз), хронический обструктивный (астматический) бронхит. Для объективной оценки пылевого воздействия и расчёта профессионального риска здоровью работников «пылевых» профессий целесообразно уточнение критериев и методологии оценки пылевой экспозиции как самостоятельной и информативной гигиенической характеристики.

**Цель исследования** – сформулировать дополнительные критерии оценки опасности воздействия ПА; обосновать методологию расчёта накопления пылевых частиц в лёгких как информативной характеристики вдыхаемой пыли, подлежащей гигиенической оценке при расчёте пылевой нагрузки, уточнить методологию управления риском здоровью работников пылевых профессий.

**Материал и методы.** В работе применён метод математического моделирования. Проведён расчёт времени нахождения пылевых частиц с учётом их дисперсности на различных участках трахеобронхиального дерева (ТБД).

**Результаты.** С учётом методологии расчёта пылевой экспозиции по величине вдыхаемой массы пыли были сформулированы дополнительные критерии оценки опасности воздействия ПА; обоснована методология расчёта накопленной массы пыли (НМП), дана оценка формирования НМП на участках ТБД с учётом временной зависимости выведения пылевых частиц различной дисперсности из ТБД. Результаты исследования способствуют совершенствованию гигиенических критериев опасности и вредности условий труда по пылевому фактору, обоснованию мер профилактики.

**Выводы.** Обоснован выбор показателя НМП как уточняющего информативность расчётной величины пылевой нагрузки. Совершенствование методологии контроля пыли способствует сохранению здоровья работников и снижению уровня профессиональных и производственно-обусловленных заболеваний.

**Ключевые слова:** гигиеническое нормирование аэрозолей с твёрдой дисперсной фазой; профессиональный риск; работники «пылевых» профессий; вдыхаемые фракции; накопленная масса пыли в лёгочной ткани

**Для цитирования:** Егорова А.М., Луценко Л.А., Сухова А.В., Колюка В.В., Федорович Г.В. К вопросу оценки профессионального риска заболеваний пылевой этиологии. *Здравоохранение Российской Федерации*. 2021; 65(4): 354-358. <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2021-65-4-354-358>

**Для корреспонденции:** Егорова Анна Михайловна, доктор мед. наук, зав. отд. медицины труда Института комплексных проблем гигиены ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора, 141014, Мытищи, Московская область. E-mail: [egorovaam@fferisman.ru](mailto:egorovaam@fferisman.ru)

**Участие авторов:** Егорова А.М. – сбор данных литературы, утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи; Луценко Л.А. – редактирование, утверждение окончательного варианта статьи; Сухова А.В., Федорович Г.В. – написание текста, редактирование; Колюка В.В. – сбор данных литературы.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 07.07.2021

Принята в печать 31.07.2021

Опубликована 07.09.2021

Anna M. Egorova<sup>1</sup>, Lydia A. Lutsenko<sup>1</sup>, Anna V. Sukhova<sup>1</sup>, Vyacheslav V. Kolyuka<sup>1</sup>, Gennady V. Fedorovich<sup>2</sup>

## On the issue of assessing the occupational risk of diseases of dust aetiology

<sup>1</sup>Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Mytishchi, Moscow Region, 141014, Russian Federation;

<sup>2</sup>Limited Liability Company NTM-Zashchita, Moscow, 115230, Russian Federation

**Introduction.** In the Russian Federation, occupational diseases associated with exposure to industrial aerosols occupy third place in the structure of occupational pathology. The predominant forms of occupational diseases included chronic dust bronchitis, pneumoconiosis (silicosis), chronic obstructive (asthmatic) bronchitis. For an objective assessment of dust exposure and calculation of the occupational health risk of employees of “dust” professions, it is advisable to clarify the criteria and methodology for assessing dust exposure as an independent and informative hygienic characteristic.

**The purpose of the study** is to formulate additional criteria for assessing the risk of exposure to industrial aerosol; to substantiate the methodology for calculating the accumulation of dust particles in the lungs as an

informative characteristic of inhaled dust that is subject to hygienic assessment when calculating the dust load, to clarify the methodology for managing the health risk of dust professions workers.

**Material and methods.** The paper uses the technique of mathematical modelling. The calculation of the time of finding dust particles, taking into account their dispersion in various parts of the tracheobronchial tree, was carried out.

**Results.** Taking into account the methodology for calculating the dust exposure by the value of the inhaled dust mass, additional criteria for assessing the hazard of exposure to industrial aerosol were formulated; the methodology for calculating the accumulated dust mass (ADM) was justified, the formation of ADM in tracheobronchial tree sites was estimated, taking into account the time dependence of the removal of dust particles of various dispersities from the tracheobronchial tree was estimated. The results of the study contribute to the improvement of hygienic criteria for the danger and harmfulness of working conditions according to the dust factor, the justification of preventive measures.

**Conclusions.** The choice of the ADM index to clarify the information content of the calculated dust load value is justified. Improving the methodology of dust control helps to preserve employees' health and reduce the level of occupational and production-related diseases.

**Keywords:** *hygienic regulation of aerosols with solid dispersed phase; occupational risk; workers in "dusty" professions; respirable fractions; the accumulated mass of dust in the lung tissue*

**For citation:** Egorova A.M., Lutsenko L.A., Sukhova A.V., Kolyuka V.V., Fedorovich G.V. On the issue of assessing the occupational risk of diseases of dust aetiology. *Zdravookhranenie Rossiiskoi Federatsii (Health Care of the Russian Federation, Russian journal)*. 2021; 65(4): 354-358. (In Russ.). <https://doi.org/10.47470/0044-197X-2021-65-4-354-358>

**For correspondence:** Anna M. Egorova, MD, PhD, DSci., Head of the Department of Occupational Medicine of the Institute of Complex Problems of Hygiene of the Federal Scientific Center of Hygiene named after F.F. Erisman of the Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing, Mytishchi, Moscow Region, 141014, Russian Federation. E-mail: [egorovaam@fferisman.ru](mailto:egorovaam@fferisman.ru)

**Information about the authors:**

Egorova A.M., <https://orcid.org/0000-0002-7929-9441>

Sukhova A.V., <https://orcid.org/0000-0002-1915-1138>

Fedorovich G.V., <https://orcid.org/0000-0002-2439-4636>

Lutsenko L.A., <https://orcid.org/0000-0001-7127-1404>

Kolyuka V.V., <https://orcid.org/0000-0002-2623-4388>

**Contribution of the authors:** *Egorova A.M.* – collection of literature data, approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article; *Lutsenko L.A.* – editing, approval of the final version of the article; *Sukhova A.V., Fedorovich G.V.* – text writing, editing; *Kolyuka V.V.* – collection of literature data.

**Acknowledgements.** The study had no sponsorship.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

Received: July 07, 2021

Accepted: July 31, 2021

Published: September 07, 2021

## Введение

В статье 209 Трудового кодекса РФ закреплено определение профессионального риска как вероятности причинения вреда здоровью в результате воздействия вредных и (или) опасных производственных факторов при исполнении работником обязанностей по трудовому договору. Процедура анализа риска включает оценку риска, управление риском и доступность информации о риске. С гигиенических позиций оценка риска здоровью проводится по следующей схеме: выявление опасности, оценка экспозиции, оценка зависимости «экспозиция–ответ» и характеристика риска. Под управлением риском понимают принятие решений и действия, направленные на обеспечение безопасности и здоровья работников.

Профессиональные заболевания, связанные с воздействием промышленных аэрозолей (ПА), занимают 3-е место в структуре профессиональной патологии. Преобладающими формами профессиональных заболеваний являются хронический пылевой бронхит (63,6%), пневмококиоз (силикоз; 23,3%) и хронический обструктивный (астматический) бронхит (12,6%) [1–4].

Основным показателем оценки степени воздействия пыли на органы дыхания и риска развития заболевания является пылевая нагрузка, т.е. реальная или прогностическая величина суммарной экспозиционной дозы пыли, которую работник вдыхает за весь период фактического

(или предполагаемого) профессионального контакта с пылью. В современных условиях оценка опасности и вредности пылевого фактора для здоровья работников основана на гравиметрическом методе измерений пыли по массе пылевых частиц, находящихся в воздухе рабочей зоны.

Для оценки профессионального риска заболеваний, вызванных воздействием пыли, важным является создание моделей прогнозирования вероятности заболевания пылевой патологией в зависимости от различных факторов.

Риск повреждения здоровья и развития пылевого заболевания определяется степенью опасности пылевого фактора, присутствующего на рабочем месте, и свойствами пыли, к которым относят химический состав; размер пылевых частиц (дисперсность), удельный вес, растворимость. Степень нарушения здоровья будет определяться интенсивностью воздействия пыли и её концентрацией в воздухе рабочей зоны; объёмом дыхания работника в зависимости от интенсивности трудового процесса, а также индивидуальной чувствительностью организма [5–7].

Для характеристики гранулометрического состава частиц введены понятия «вдыхаемая фракция» как массовая доля всех взвешенных в воздухе частиц, которые вдыхаются через нос и рот. По глубине проникновения пылевых частиц в дыхательные пути выделяют экстраторакальную (пылевые частицы не попадают за пределы гортани) и торакальную (пылевые частицы проникают ниже гортани в дыхательные пути) фракции. Торакальная фракция,

в свою очередь, подразделяется на трахеобронхиальную (пылевые частицы оседают в трахее и крупных бронхах) и респираторную (пылевые частицы, которые проникают в нижние дыхательные пути) фракции\*.

Согласно публикациям [8–10], частицы с масс-медианным аэродинамическим диаметром крупнее 10 мкм полностью осаждаются в полости носа, а при дыхании через рот не проникают глубже верхних бронхов. Отдельные авторы считают, что частицы размером более 10 мкм могут проникать глубже в дыхательные пути [11]. Важным фактором, влияющим на риск развития пылевых заболеваний органов дыхания, является то, что с увеличением стажа работы в условиях воздействия ПА слизистая оболочка верхних дыхательных путей утрачивает защитный механизм, и в этих условиях частицы пыли способны проникать из верхних дыхательных путей в более глубокие дыхательные пути – мелкие бронхи, бронхиолы и альвеолы. В этом случае более глубоко проникают и крупнодисперсные пылевые частицы [12].

По мнению других авторов, наиболее информативным показателем воздействия на организм пылевых частиц является площадь поверхности пылевых частиц [13–15].

Вероятность развития повреждающего эффекта для слизистой трахеобронхиального дерева (ТБД) и усиление фиброгенного действия возрастает в случаях, когда повышается интенсивность пылевого воздействия. Так, при пиковых концентрациях, превышающих среднесменные концентрации в 5 и более раз, отмечается снижение скорости выведения пылевых частиц из лёгких [16–19].

Взаимосвязь биологических эффектов с величиной формируемого в лёгочной ткани пылевого депо подтверждена на ингаляционной модели экспериментального антракоза при оценке действия 2 видов малозольной пыли каменного угля, близких по петрографическому составу (гелитолиты); стадии метаморфизма (марки «СС» и «К»), доле золы (11,8 и 16,1%) и свободного диоксида кремния (2,18 и 1,85%) [20].

Созданы различные модели оседания пылевых частиц в лёгких [21–23], позволяющие определить патогенез болезней органов дыхания «пылевой» этиологии:

- основанная на статистической теории дробления;
- динамическая модель, основанная на распределении частиц в зависимости от размера;
- модель, разработанная на основе распределения аэрозольных частиц на стенках ТБД [22, 24, 25].

Однако важно и обоснование гигиенической значимости накопленной массы пыли с учётом протекающих в органах дыхания процессов самоочищения дыхательных путей от твёрдых частиц. Научное обоснование методов гигиенической оценки вдыхаемой доли пыли, позволяющих как определить накопление пылевых частиц в различных участках дыхательных путей, так и оценить процессы элиминации пылевых частиц из дыхательных путей, позволит прогнозировать ожидаемые эффекты вредного воздействия ПА в зависимости от характеристики пыли и стажа работы и совершенствовать меры профилактики.

**Цель исследования** – сформулировать дополнительные критерии оценки опасности воздействия ПА; обосно-

вать методологию расчёта накопления пылевых частиц в лёгких как информативной характеристики вдыхаемой пыли, подлежащей гигиенической оценке при расчёте пылевой нагрузки, уточнить методологию управления риском здоровью работников пылевых профессий.

## Материал и методы

В работе применён метод математического моделирования. Проведён расчёт времени нахождения пылевых частиц с учётом их дисперсности на различных участках ТБД. В математическую модель исследования динамики поведения аэрозольных частиц в лёгких и времени их выведения заложен инерционный механизм очистки дыхательных путей от твёрдых пылевых частиц, описанный в классической модели Э. Вейбеля [26, 27], и её модификации [28–30].

## Результаты исследования

Согласно расчётам частицы больших диаметров (10–20 мкм), оседающие в проксимальных отделах ТБД, представленного крупными и средними бронхами (1–4-я генерации воздухопроводящих путей), в которых скорость мукоцилиарной эскалации достаточно велика ( $v = 10^{-3} - 10^{-4}$  см/с), выносятся за первые 5–9 ч. При этом на временной зависимости потока прослеживается ясно выраженный максимум в первые 3 ч после прекращения вдыхания пылевых частиц. Практическая важность вывода, сделанного по итогам расчётов, в том, что для очистки воздухопроводящих путей ТБД потребуется время около 8 ч.

При расчёте вдыхания пылевых частиц диаметром 10 мкм в течение 8-часовой рабочей смены показано, что в первые часы после начала ингаляции выводятся частицы из проксимальных участков ТБД (4–6-я генерации воздухопроводящих путей). Однако здесь оседает лишь незначительная часть частиц пыли. С течением времени длина участка очистки растёт и к 5 ч достигает терминальных бронхиол (14–15-я генерации воздухопроводящих путей). Теперь процесс выноса затрагивает уже значительную часть осевших частиц пыли. Максимум выведения пылевых частиц наступает примерно через 10 ч введения. После этого границы участка выведения пыли сдвигаются ещё больше вглубь дыхательных путей, где пыли оседает сравнительно мало. Через 15–20 ч после начала вдыхания (или 7–12 ч после окончания) практически вся осевшая пыль выводится из воздухопроводящих путей.

Иначе обстоит дело с очисткой лёгких от более мелких частиц пыли. Анализ аналогичных данных для частиц диаметром 4 мкм, которые способны проникать в дистальные отделы дыхательных путей, показывает, что в этом случае на скорость выведения пылевых частиц особенно влияет большая их глубина оседания. При этом, если наиболее вероятная глубина оседания частиц с диаметром 10 мкм оказывается на уровне 6-й генерации воздухопроводящих путей, то для частиц с диаметром 4 мкм глубина оседания достигает 14-й генерации. На этом уровне генерации воздухопроводящих путей скорость мукоцилиарной эскалации очень мала (в десятки раз меньше, чем в трахее и крупных бронхах). Мелкие частицы диаметром 1–4 мкм выносятся гораздо медленнее (за сутки и более), а временная зависимость потока спадает монотонно.

\* ГОСТ Р ИСО 7708 «Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле».

Результаты изучения временной зависимости выведения пылевых частиц различных диаметров, осевших за 8-часовую смену, показали, что частицы с диаметром 20 мкм практически не задерживаются в лёгких и выводятся из ТБД по мере поступления.

Частицы диаметром 10 мкм через 7–12 ч после окончания вдыхания пыли практически полностью выводятся из ТБД. С гигиенических позиций такой результат означает, что в перерыве между рабочими сменами механизм мукоцилиарной эскалации обеспечивает полную очистку лёгких от крупных пылевых частиц (диаметром 10 мкм).

Однако представленные результаты свидетельствуют о наиболее медленном выведении из дыхательных путей и преимущественном накоплении в лёгких осевших частиц с небольшими диаметрами. Если говорить о частицах с диаметром 4 мкм, то можно утверждать, что для практически полного их выведения необходимо не менее 2 сут, а для выведения ещё меньших частиц необходимо ещё большее время. Частицы менее 4 мкм накапливаются в столь глубоких отделах ТБД, что не успевают вывестись к началу следующей смены, причём доля таких «депонированных» частиц значительна. Отношение потока выводимых частиц перед следующей сменой (через 18 ч отдыха) к потоку в конце смены (когда его величина максимальна) составляет более 30%.

Следовательно, при планировании профилактических мероприятий для работников, на рабочих местах которых присутствуют пылевые аэрозольные частицы, нужно учитывать не только концентрацию и дисперсность пылевых частиц в воздухе рабочей зоны, временную периодизацию воздействия пыли, длительность рабочей смены и время перерыва между рабочими сменами.

### Обсуждение

Аэрозольные частицы, способные осаждаться в дыхательных путях здорового человека, рассматриваются в качестве одной из основных причин развития профессиональных заболеваний лёгких. На современном этапе для объективной оценки пылевого воздействия и расчёта профессионального риска здоровью работников «пылевых» профессий требуется совершенствование критериев и методологии оценки пылевой экспозиции.

Систематизированы публикации и собственные материалы по критериям оценки ПА; накоплению и выведению пылевых частиц. Дано обоснование выбора накопленной массы пыли как показателя, уточняющего информативность расчётной величины пылевой нагрузки с учётом элиминации пылевых частиц из дыхательных путей.

Результаты анализа накопления пыли в лёгких в зависимости от стажа работы, профессии позволяют создать риск-ориентированные производственные модели, снизить уровни профессиональных рисков до приемлемого уровня.

Приведённые оценки демонстрируют целесообразность углублённого изучения особенностей распределения оседающих пылевых частиц по поколениям воздухопроводящих путей с учётом скорости последующей физиологической мукоцилиарной очистки дыхательных путей. Одновременно в качестве фактора риска развития пылевой патологии органов дыхания следует рассматривать интенсивность лёгочного воздухообмена в зависимости от производственных условий (тяжесть труда, пара-

метры микроклимата) и индивидуальных особенностей организма работника с учётом функционального состояния дыхательной и сердечно-сосудистой систем, установленных по результатам медицинского обследования.

С учётом совокупности полученных материалов можно заключить, что риск здоровью работников пылевых профессий не может быть оценён только массовой концентрацией пыли; необходим учёт размеров частиц вдыхаемого аэрозоля и их дальнейшего поведения в дыхательных путях. Однако выбор наиболее адекватного показателя, знание которого (с гигиенических позиций) позволит более обоснованно контролировать, оценивать, регламентировать и, главное, прогнозировать риск воздействия на здоровье работающих ПА, разнообразных по вещественному составу и дисперсности частиц, остаётся недостаточно ясным.

### Заключение

Результаты исследования показывают, что в целях совершенствования гигиенического нормирования пыли необходимо не только определение массовой концентрации пыли в воздухе, изучение дисперсного состава вдыхаемых пылевых частиц, но и определение интенсивности и длительности воздействия пыли, создание математических моделей накопления пыли в лёгких.

Совершенствование методологии контроля пыли способствует сохранению здоровья работников и снижению уровня профессиональных и производственно-обусловленных заболеваний. От сохранения профессионального здоровья работников зависит трудовой потенциал Российской Федерации.

### ЛИТЕРАТУРА

(п.п. 3, 5, 7, 9–11, 13–15, 17, 18, 21–23, 25–27  
см. REFERENCES)

1. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2020 году». М.; 2021.
2. Ткачев В.В. Оценка риска профессиональных заболеваний пылевой этиологии. В кн.: Измеров Н.Ф., Денисов Э.И., ред. *Профессиональный риск для здоровья работников*. М.: Тривант; 2003.
4. Басанец А.В. О классификации пневмокониоза: новая редакция международной организации труда 2000 года. Доступно: <http://www.ifp.kiev.ua/doc/journals/upj/03/pdf03-4/61.pdf>
6. Кудинов В.П. Суммарная пылевая нагрузка за год работы в очистном забое. В кн.: *Материалы Республиканской конференции «Вопросы гигиены труда и профессиональной патологии»*. Киев: Здоров'я; 1970: 30–3.
8. Спурный К., Йех Ч., Седлачек Б., Шторх О. *Аэрозоли*. М.: Атомиздат; 1964.
12. Еловская Л.Т., Капитанов Ю.Т., Григорян Э.А., Яглов В.В. О действии грубодисперсной пыли на органы дыхания (экспериментальные исследования). В кн.: *Методы анализа и оценка воздействия фиброгенных пылей*. М.; 1987: 34–8.
16. Феоктистов Г.С. Экспериментальные данные к вопросу о задержке пыли в легких человека при различных режимах дыхания. *Гигиена и санитария*. 1968; 47(2): 21–6.
19. Борисенкова Р.В., Махотин Г.И. *Труд и здоровье горнорабочих*. М.; 2001.
20. Луценко Л.А., Гвоздева Л.Л. Использование результатов эксперимента для оценки эффектов пылевой экспозиции работников угольной промышленности». *Znanstvena misel*. 2018; (6-1): 21–7.

24. Колмогоров А.Н. О логарифмически-нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении. *Доклады Академии наук СССР*. 1941; 31(2): 99–101.
28. Федорович Г.В. Роль инерционного механизма в процессе очистки воздуха в легких от аэрозольных частиц. *Пульмонология*. 2013; (2): 114–8.
29. Федорович Г.В. Модель мукоцилиарной очистки лёгких. *Пульмонология*. 2016; 26(2): 222–30. <https://doi.org/10.18093/0869-0189-2016-26-2-222-230>
30. Федорович Г.В. *Рациональная диагностика профессиональных заболеваний*. Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing; 2019.

## REFERENCES

1. State report «On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population in the Russian Federation in 2020». Moscow; 2021. (in Russian)
2. Tkachev V.V. Risk Assessment of Occupational Diseases of Dust Etiology. In: Izmerova N.F., Denisov E.I., eds. *Occupational Risk for Workers' Health (Manual) [Professional'nyy risk dlya zdorov'ya rabotnikov]*. Moscow: Trovant; 2003. (in Russian)
3. Parker J.E., Wagner G.R. Silicosis. In: *Encyclopedia of Occupational Safety and Health. Volume 3*. Geneva; 1998.
4. Basanets A.V. On the classification of pneumoconiosis: a new edition of the International Labor Organization in 2000. Available at: <https://www.ifp.kiev.ua/doc/journals/upj/03/pdf03-4/61.pdf> (in Russian)
5. Sebastien P., Begin R. Etiopathogenesis of pneumoconiosis. In: *Encyclopedia of Occupational Safety and Health. Volume 3*. Geneva; 1998.
6. Kudinov V.P. The total dust load for a year of work in the working face. In: *Problems of Occupational Hygiene and Occupational Pathology [Materialy Respublikanskoj konferentsii «Voprosy gigeny truda i professional'noy patologii»]*. Kiev: Zdorov'ya; 1970: 30–3. (in Russian)
7. Muir D.C.F. Correction in cumulative risk in silicosis exposure assessment. *Am. J. Ind. Med.* 1991; 19(4): 40–3. <https://doi.org/10.1002/ajim.4700190414>
8. Spurnyy K., Yekh Ch., Sedlachek B., Shtorkh O. *Aerosols [Aerozoli]*. Moscow: Atomizdat; 1964. (in Russian)
9. Gross P. Consideration of the aerodynamic equivalent diameter of respirable mineral fibers. *Amer. Industr. Hyg. Assos.* 1981; 42(6): 445–9.
10. Landahl H.D., Herrmann R.D. On the retention air-born particulates in the human lung. *J. Ind. Hyg. And Toxic.* 1948; 30(3): 181–8.
11. Walkenhorst W. Foundations of the small particle deposition in bronchial and alveolar space. *Med. Clin.* 1971; 66(9): 303–7. (in German)
12. Elovskaya L.T., Kapitanov Yu.T., Grigoryan E.A., Yaglov V.V. On the action of coarse dust on the respiratory system (experimental research). In: *Methods of Analysis and Assessment of the Impact of Fibrogenic Dusts [Metody analiza i otsenka vozdeystviya fibrogennykh pylej]*. Moscow; 1987: 34–8. (in Russian)
13. 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. *Toxicol. Appl. Pharmacol.* 2001; 175(3): 191–9. <https://doi.org/10.1006/taap.2001.9240>
14. Oberdörster G. Toxicology of ultrafine particles: in vivo studies. *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Series A.* 2000; 1775(358): 2719–40.
15. Lison D., Lardot C., Huaux F., Zanetti G., Fubini B. Influence of particle surface area on the toxicity of insoluble manganese dioxide dusts. *Arch. Toxicol.* 1997; 71(12): 725–9. <https://doi.org/10.1007/s002040050453>
16. Feoktistov G.S. Experimental data on the issue of dust retention in human lungs under different breathing modes. *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 1968; 47(2): 21–6. (in Russian)
17. Brown J.H., Cook K.M., Ney F.G., Hatch T. Influence of particle size upon the retention of particulate matter in the human lung. *Am. J. Public Health Nations Health.* 1950; 40(4): 450–80. <https://doi.org/10.2105/ajph.40.4.450>
18. Landahl H.D., Black S.J. Penetration of airborne particulates through the human nose. *J. Ind. Hyg. Toxic.* 1947; 29(4): 269–77.
19. Borisenkova R.V., Makhotin G.I. *Labor and Health of Miners [Trud i zdorov'e gornorabochikh]*. Moscow; 2001. (in Russian)
20. Lutsenko L.A., Gvozdeva L.L. Use of experimental results for estimation of effects of dust exposition of employees of the coal industry. *Znanstvena misel*. 2018; (6-1): 21–7. (in Russian)
21. 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; 7(64): 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2017.08.028>
22. Hofmann W., Mainelis G., Mohamed A. Modeling approaches in current lung dosimetry models. *Environ. Int.* 1996; 22(1): 965–76.
23. Musante C.J., Martoner T.B. Computer simulations of particle deposition in the developing. *Human Lung.* 2000; 50(8): 1426–32. <https://doi.org/10.1080/10473289.2000.10464176>
24. Kolmogorov A.N. On the logarithmic-normal law of particle size distribution during crushing. *Doklady Akademii nauk SSSR.* 1941; 31(2): 99–101. (in Russian)
25. Hori M., Uchida M. Application of the theory of Markov processes to comminuting. P.I. The case of discrete time parameter. *Kodai Math. Sem. Rep.* 1967; 19: 174–88.
26. Weibel E.R. *Morphometry of the Human Lung*. New York: Academic; 1963.
27. Swift D.L. Aerosol characteristics and generation. In: Moren F., Dolovich M.B., Newhouse M.T., eds. *Aerosols in Medicine. Principles, Diagnosis and Therapy*. New York: Elsevier Science (Biomedical Division); 1985: 53–76.
28. Fedorovich G.V. A role of inertial mechanism for clearance of aerosol particle from the lung. *Pul'monologiya*. 2013; (2): 114–8. (in Russian)
29. Fedorovich G.V. Model of mucociliary clearance of the lung. *Pul'monologiya*. 2016; 26(2): 222–30. <https://doi.org/10.18093/0869-0189-2016-26-2-222-230> (in Russian)
30. Fedorovich G.V. *Rational Diagnosis of Occupational Diseases [Ratsional'naya diagnostika professional'nykh zabolevaniy]*. Saarbrücken, Deutschland: Palmarium Academic Publishing; 2019. (in Russian)