Качественная оценка загрязнения воздуха рабочей зоны производств энергоёмких материалов наноразмерными аэрозолями с твёрдой дисперсной фазой¹ФГУП «Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии и профпатологии» ФМБА России, ул. Землячки, 12, Волгоград, Россия, 400048;²ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный медицинский университет» Минздрава России, площадь Павших борцов, 1, Волгоград, Россия, 400131

Организация технологических процессов производств энергоёмких материалов характеризуется наличием операций измельчения, смешения и фракционирования твёрдых компонентов рецептур, приводящих к образованию в воздухе рабочей зоны аэрозолей с широким диапазоном дисперсности твёрдой фазы.

Цель исследования — качественная оценка возможного загрязнения воздуха рабочей зоны производств энергоёмких материалов наноразмерными аэрозолями с твёрдой дисперсной фазой.

Отбор проб воздуха рабочей зоны и смывов с твёрдых горизонтальных поверхностей выполняли в производстве энергоёмких материалов. Отбор пробы осуществляли путём принудительной циркуляции исследуемого воздуха через поглотительные приборы Полежаева. В качестве поглотительной среды использовали раствор Тритона ТХ-114 с массовой концентрацией 2,0 мг/дм³. Смывы с поверхностей выполняли при помощи тампонов из ткани, смоченных раствором Тритона ТХ-114 с массовой концентрацией 2,0 мг/дм³. Размеры частиц в пробах определяли с использованием NanotracerULTRA (Microtrac).

В воздухе рабочей зоны и в смывах с горизонтальных поверхностей обнаружены частицы алюминия и нитроцеллюлозы с размерами от 36 до 102 нм. Исследование фракционного состава порошков гексогена и алюминия марки АСД-1 показало наличие в них наноразмерных частиц.

Воздух рабочей зоны и твёрдые горизонтальные поверхности на отдельных стадиях производства энергоёмких материалов загрязнены наноразмерными пылевыми частицами; в составе порошков некоторых штатных компонентов рецептур присутствуют наноразмерные частицы; смывы с твёрдых горизонтальных поверхностей являются адекватным качественным индикатором присутствия наноаэрозолей в воздухе рабочей зоны.

Этика. Настоящая статья не содержит каких-либо данных с участием людей и животных в качестве объекта исследования.

Ключевые слова: аэрозоли; твёрдая дисперсная фаза; наноразмерные частицы; ультрамелкие частицы; фракционный состав; воздух рабочей зоны; смывы с поверхностей; отбор проб; производство энергоёмких материалов

Для цитирования: Филатов Б.Н., Латышевская Н.И., Крылова Н.В., Горкина И.К., Великородная Ю.И., Антонов В.А., Новикова О.Н. Качественная оценка загрязнения воздуха рабочей зоны производств энергоёмких материалов наноразмерными аэрозолями с твёрдой дисперсной фазой. *Мед. труда и пром. экол.* 2021; 61(12): 828–832. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-12-828-832>

Для корреспонденции: Крылова Наталья Валерьевна, зав. лаб. гигиены Федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии и профпатологии» Федерального медико-биологического агентства, канд. биол. наук. E-mail: krilova@vhtop.ru

Участие авторов:

Филатов Б.Н. — концепция и дизайн исследования, редактирование;

Латышевская Н.И. — редактирование;

Крылова Н.В. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, написание текста;

Горкина И.К. — концепция и дизайн исследования, сбор и обработка данных, редактирование;

Великородная Ю.И. — сбор и обработка данных, редактирование;

Антонов В.А. — редактирование;

Новикова О.Н. — редактирование.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 29.11.2021 / **Дата принятия к печати:** 02.12.2021 / **Дата публикации:** 25.12.2021

Boris N. Filatov^{1,2}, Natalya I. Latyshevskaya², Natalya V. Krylova¹, Irina K. Gorkina¹, Yulya I. Velikorodnaya¹, Valery A. Antonov¹, Olga N. Novikova¹

Qualitative assessment of air pollution in the working area of energy-intensive materials production by nanoscale aerosols with a solid dispersed phase¹Research Institute for Hygiene, Toxicology and Occupational Pathology, 12, Zemlyachki St., Volgograd, Russia, 400048;²Volgograd State Medical University, 1, Pavshikh Bortsov Sq., Volgograd, Russia, 400131

The presence of grinding, mixing, and fractionation of solid components of formulations leads to the formation of aerosols in the air of the working area with a wide range of dispersion of the solid phase — all this characterizes the organization of technological processes for the production of energy-intensive materials.

The study aims to give a qualitative assessment of possible air pollution of the working area of energy-intensive materials production by nanoscale aerosols with a solid dispersed phase.

The researchers carried out the sampling of the working area air and flushes from solid horizontal surfaces to produce energy-intensive materials. We carried out the sampling by forced circulation of the test air through the absorption devices of Polezhaev. Scientists used Triton TX-114 solution with a mass concentration of 2.0 mg/dm³ as an absorption medium. The researchers performed flushing from surfaces using cloth tampons moistened with Triton TX-114 solution with a mass concentration of 2.0 mg/dm³. We determined the particle sizes in the samples using NanotracerULTRA (Microtrac).

Scientists found aluminum and nitrocellulose particles with sizes from 36 to 102 nm in the air of the working area and flushes from horizontal surfaces. The study of the fractional composition of RDX and aluminum powders of the ASD-1 brand showed the presence of nanoscale particles in them.

Nanoscale dust particles pollute the air of the working area and solid horizontal surfaces at certain stages of the production of energy-intensive materials. There are nanoscale particles in the composition of powders of some standard components of formulations. Flushes from solid horizontal surfaces are an adequate qualitative indicator of the presence of nanoaerosols in the air of the working area.

Ethics. This article does not contain any data involving humans and animals as the object of research.

Keywords: aerosols; solid dispersed phase; nanoscale particles; ultrafine particles; fractional composition; air of the working area; flushes from surfaces; sampling; production of energy-intensive materials

For citation: Filatov B.N., Latyshevskaya N.I., Krylova N.V., Gorkina I.K., Velikorodnaya Yu.I., Antonov V.A., Novikova O.N. Qualitative assessment of air pollution in the working area of energy-intensive materials production by nanoscale aerosols with a solid dispersed phase. *Med. truda i prom. ekol.* 2021; 61(12): 828–832. <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-12-828-832> (in Russian)

For correspondence: Natalia V. Krylova, the head of the Hygiene laboratory, Research Institute for Hygiene, Toxicology and Occupational Pathology, FMBA, Cand. of Sci. (Biol.). E-mail: krilova@rihtop.ru

Contribution:

Filatov B.N. — concept and design of the study, editing;

Latyshevskaya N.I. — editing;

Krylova N.V. — concept and design of the study, data collection and processing, writing the text;

Gorkina I.K. — concept and design of the study, data collection and processing, editing;

Velikorodnaya Yu.I. — data collection and processing, editing;

Antonov V.A. — editing;

Novikova O.N. — editing.

Funding. The study had no funding.

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

Received: 29.11.2021 / Accepted: 02.12.2021 / Published: 25.12.2021

Загрязнение воздуха рабочей зоны твёрдыми частицами характерно для большинства предприятий, на которых технологические процессы сопровождаются пылеобразованием. Образующиеся аэрозоли, как правило, характеризуются широким диапазоном дисперсности и представлены частицами фиброгенного, токсического или смешанного типа действия [1–6].

Известно, что по сравнению с микрометровым диапазоном наноразмерные частицы могут обладать более выраженным вредным действием, как на клеточном, так и на органо-системном уровне [7–18].

Специфика организации технологических процессов на предприятиях по производству энергоёмких материалов характеризуется большим количеством операций по измельчению, смешению и классификации твёрдых компонентов рецептур, которые являются потенциальными источниками образования аэрозолей наноразмерных и ультрадисперсных фракций.

До недавнего времени обеспечение безопасности производств энергоёмких материалов вполне закономерно было направлено, прежде всего, на снижение воздействия на персонал опасного производственного фактора — чрезвычайной взрывоопасности. При этом токсичности химических веществ, используемых в штатных смесях, придавалось второстепенное значение. В частности, это касается и оценки потенциальной опасности для здоровья персонала, возникающей при образовании в производственной среде наноразмерных аэрозолей твёрдых компонентов рецептур.

Цель исследования — качественная оценка возможного загрязнения воздуха рабочей зоны производств энергоёмких материалов наноразмерными аэрозолями с твёрдой дисперсной фазой.

Изучение возможного загрязнения воздуха рабочей зоны и смывов с твёрдых горизонтальных поверхностей проводили в технологических подразделениях выгрузки алюминиевого порошка, операций измельчения, отжима влажной массы и приготовления навесок нитроцеллюлозы, приготовления смесей и топливной массы. По-

скольку производство энергоёмких материалов представлено, в основном, периодическими процессами, отбор проб воздуха осуществляли перед началом и в течение технологических операций. Смывы с поверхностей выполняли перед началом технологического процесса и по окончании отбора проб воздуха или технологического процесса.

Пробы воздуха отбирали в поглотительные приборы Полежаева с длиной барботёра 150 мм аспирацией при помощи вакуумного побудителя с объёмной скоростью 0,7–1,0 дм³/мин. Время отбора пробы составляло 20–30 минут в зависимости от продолжительности технологической операции. В поглотительные приборы вносили 10 см³ раствора Тритона ТХ-114 с массовой концентрацией 2,0 мг/дм³.

После отбора пробы поглотительный раствор количественно переносили в полипропиленовую пробирку, укупоривали и доставляли в лабораторию для дальнейшего определения фракционного состава присутствующих частиц.

Смывы с твёрдых горизонтальных поверхностей выполняли при помощи тампонов из ткани типа батист с использованием шаблона площадью 1,0 дм². Выделенный участок поверхности протирала поочерёдно двумя влажными тампонами, смоченными водным раствором Тритона ТХ-114 с массовой концентрацией 2,0 мг/дм³, а затем — сухим. Все тампоны помещали в полипропиленовую пробирку вместимостью 50,0 см³, укупоривали и доставляли в лабораторию.

Перед анализом в пробирки с тампонами вносили по 10,0 см² водного раствора Тритона ТХ-114 с массовой концентрацией 2,0 мг/дм³ и выполняли экстракцию содержимого смыва в раствор с использованием ультразвуковой ванны.

Размеры частиц в пробах определяли с помощью *NanotracerULTRA (Microtrac)*. Аликвоты поглотительных растворов и экстрактов смывов помещали в кюветное отделение для определения размеров присутствующих частиц.

При исследовании компонентов высокоэнергетических рецептур (гексоген, тротил, полиоксиметилен, алюминий марки АСД-1) навеску исследуемого материала (около 100 мг) ресуспендировали в 3 мл деионизированной воды и помещали в кюветное отделение.

Все измерения производили в трехкратных повторах. Расчёты среднего размера частиц и их процентное соотношение выполняли с использованием аппаратного программного обеспечения *Microtrac FLEX*.

Определение наноразмерных структур в пробах, содержащих нитроцеллюлозу, проводили в режиме «*Irregular*». По мнению ряда исследователей алгоритм математической обработки данных, используемый в программном обеспечении оптических наносайзеров, является достаточно эффективным для получения точной оценки размеров не только сферических, но и линтерных (волоконистых) частиц [19].

В воздухе рабочей зоны при выполнении операции вакуумной выгрузки пассированного порошка алюминия обнаружены частицы размером 61–102 нм, доля которых составила 26,2–88,0 % от всех частиц, присутствующих в пробах во взвешенном состоянии. При этом в смывах с поверхностей присутствовали частицы с размерами 36–102 нм, составившие 26,2–97,3 % от всех частиц, присутствующих в пробах во взвешенном состоянии.

Ультрадисперсные аэрозоли обнаружены на рабочих местах, связанных с использованием в технологическом процессе нитрованной целлюлозы. Размеры наноструктурированных частиц нитроцеллюлозы в объектах производственной среды варьировались в зависимости от технологической операции. Наиболее мелкая фракция (размер 43–86 нм) обнаружена в воздухе на рабочем месте аппаратчика во время выполнения технологической операции приготовления навесок нитроцеллюлозы спецназначения. При этом в пробах регистрировалось наибольшее количество наноразмерных частиц, которое составляло 73,0–93,0% от всех частиц, присутствующих в пробе во взвешенном состоянии. Ультрадисперсные аэрозоли нитроцеллюлозы с размером частиц 60–102 нм обнаружены также на рабочих местах аппаратчиков отжима влажного продукта, размолящика, приготовления смесей и заливщика. Указанные частицы составляли 18,2–88,4% от всех частиц, находящихся в пробе во взвешенном состоянии. На рабочих местах размолящика нитроцеллюлозы и заливщика (операция приготовления топливной массы) ультрамелкие частицы составляли 82,1–88,4% (от общего числа частиц, находящихся в пробе во взвешенном состоянии). Для этих рабочих мест также характерна наибольшая доля частиц размером 60 нм — 10,8% и 17,6% соответственно от всех частиц, находящихся в пробе во взвешенном состоянии.

Присутствие в воздухе рабочей зоны наноструктурированных частиц нитроцеллюлозы было подтверждено результатами, полученными при анализе смывов с технологического оборудования на рабочих местах аппаратчиков отжима влажного продукта, рабочих по приготовлению смесей, размолящика и заливщика. Размер зарегистрированных частиц варьировался от 36 нм до 102 нм. Наибольшее содержание наноструктурированных частиц отмечено на операции размола нитроцеллюлозы — 97,3 % от всех частиц, находящихся в пробе во взвешенном состоянии. При этом указанной операции соответствуют наименьшие из зарегистрированных частиц размером — 36 нм. На рабочих местах аппаратчиков отжима влажного

продукта, приготовления смесей и заливщика содержание наноразмерных частиц в смывах составляло в основном 61,9–90,7% от всех частиц, находящихся в пробе во взвешенном состоянии.

Исследование фракционного состава некоторых традиционных компонентов высокоэнергетических смесей позволило обнаружить наличие наноразмерных частиц в самом исходном сырье. Так, в порошке гексогена идентифицированы частицы диаметром 51–102 нм, процент которых от всех частиц, присутствующих в пробе во взвешенном состоянии, составил более 95%. Тротил был представлен в основном частицами размером 144–171 нм (98,4% от всех частиц, присутствующих в пробе во взвешенном состоянии), полиоксиметилен — 171–204 нм (94,9% от всех частиц, присутствующих в пробе во взвешенном состоянии).

В порошке алюминия марки АСД-1 обнаружены частицы размером от 30 до 102 нм.

Имеющиеся в настоящее время способы определения качественного и количественного состава наноаэрозолей в воздухе рабочей зоны не пригодны для применения в условиях взрывоопасного производства, поскольку не предусматривают использование взрывозащищенного оборудования. В связи с этим для решения задачи качественного определения возможного присутствия наноразмерных аэрозолей с твёрдой дисперсной фазой в воздухе рабочей зоны производств энергоёмких материалов были разработаны приёмы отбора проб, приемлемые для использования во взрывоопасных условиях.

Известно, что содержание частиц в воздухе и на поверхностях обычно связаны между собой [20], в связи с чем была поставлена задача получить информацию о присутствии наноаэрозолей в воздушной среде путём смывов с твёрдых горизонтальных поверхностей.

Отбор проб с поверхностей на липкую ленту не представлялся целесообразным, так как предполагалось, что при определении данным способом количество наноразмерных пылевых частиц на ленте будет крайне незначительным по сравнению с частицами респираторной и более крупных фракций. В то же время процедура выполнения смывов чистой промысловочной средой позволяет не только произвести выемку искомого загрязнителя в объёме, необходимом для проведения дальнейших исследований, но и получить (путём экстракции из тампонов в водный раствор с последующей седиментацией крупных частиц) супернатант, содержащий интересующие фракции. Данное обстоятельство также послужило основанием для отбора проб воздуха рабочей зоны путём барботаж через водный раствор.

С учётом того, что микро- и наночастицы твёрдых компонентов высокоэнергетических рецептур, как правило, имеют гидрофобный характер, для уменьшения поверхностного натяжения на поверхности раздела термодинамических фаз, улучшения смачиваемости частиц и облегчения их перехода в водную фазу был использован водный раствор неионогенного поверхностно-активного вещества Тритон ТХ-114.

Кроме того, в дополнение к вышеизложенному следует отметить, что предложенный способ отбора проб позволяет использовать полученный супернатант для изучения морфологии частиц при помощи электронного микроскопа.

Выполненные исследования показали присутствие в воздухе рабочей зоны наноаэрозолей алюминия и нано-

структурированных частиц нитроцеллюлозы на стадиях выгрузки алюминиевого порошка, измельчения, отжима влажной массы и приготовления навесок нитроцеллюлозы, приготовления смесей и топливной массы.

Помимо этого, была подтверждена целесообразность дополнения анализа проб воздуха рабочей зоны на содержание наноаэрозолей процедурой смыва с горизонтальных твёрдых поверхностей, позволяющей установить присутствие наноразмерных пылей в воздухе контролируемых помещений (в тот или иной промежуток времени).

Анализ комплекса полученных результатов позволил усовершенствовать подходы к определению присутствия в воздухе рабочей зоны наноразмерных пылевых частиц, по следующему алгоритму.

1. Отбор проб воздуха рабочей зоны:

а) изучение особенностей технологического процесса (операции и компоненты рецептур, способные приводить к образованию наноаэрозолей);

б) выбор места для отбора проб (определение возможных источников образования наноаэрозолей; при наличии нескольких источников установление их связи с рабочей операцией; учёт внешних источников поступления аэрозолей в результате промышленной деятельности или дорожного движения; определение направления потоков воздуха, создаваемых принудительной и естественной вентиляцией);

в) выбор мест расположения поглотительных приборов (по возможности с двух сторон от ожидаемой зоны наибольшей концентрации аэрозоля на высоте 1,5 метра);

г) отбор проб воздуха до начала технологического процесса (при возможности) и в течение или по его окончании.

2. Смывы с твёрдых горизонтальных поверхностей рабочей зоны:

а) выбор поверхностей, наиболее близких к зоне предполагаемой максимальной концентрации аэрозоля с учётом исследований, выполненных для определения точек отбора воздуха. Поверхность должна быть гладкой и однородной (металл, окрашенные поверхности);

б) подготовка участков для отбора смывов путём тщательной промывки дистиллированной водой;

в) выполнение смывов с одного и того же участка перед началом технологического процесса (контрольный) и по его окончании.

Наличие наночастиц в порошках компонентов рецептур позволяет предположить, что с учётом особенностей технологических процессов производств энергоёмких материалов, включающих большое число механических операций, следует ожидать образование в воздухе рабочей зоны наноразмерных аэрозолей указанных компонентов.

Присутствие в воздухе рабочей зоны наноразмерных аэрозолей компонентов высокоэнергетических смесей с потенциально более высокой токсичностью по сравнению с макроформами вещества обуславливает необходимость изучения их влияния на здоровье персонала и эффективности штатных средств индивидуальной защиты, в первую очередь органов дыхания.

Воздух рабочей зоны и твёрдые горизонтальные поверхности на отдельных стадиях производства энергоёмких материалов загрязнены наноразмерными пылевыми частицами.

В составе порошков некоторых штатных компонентов рецептур присутствуют наноразмерные частицы.

Смывы с твёрдых горизонтальных поверхностей являются адекватным качественным индикатором присутствия наноаэрозолей в воздухе рабочей зоны.

Список литературы

- Лисецкая Л.Г., Шаяхметов С.Ф., Меринов А.В. Метрический и морфологический анализ взвешенных частиц в воздухе алюминиевого производства. *Мед. труда и пром. экол.* 2017; 10: 50–3.
- Зайцева Н.В., Уланова Т.С., Злобина А.В., Волкова М.В., Гилева М.И. Исследования наноразмерных частиц в составе промышленных аэрозолей и взвешенных веществ в воздухе рабочей зоны. *Токсикологический вестник.* 2017; 1: 20–6. <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2017-1-20-26>
- Santos R.J., Vieira M.T. Assessment of airborne nanoparticles present in industry of aluminum surface treatments. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene.* 2017; 14(3): D29–D36. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1254782>
- Curwin B., Bertke S. Exposure Characterization of Metal Oxide Nanoparticles in the Workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene.* 2011; 8(10): 580–7. <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.613348>
- Brenner S.A., Neu-Baker N.M., Eastlake A.C., Beaucham C.C., Geraci C.L. NIOSH field studies team assessment: Worker exposure to aerosolized metal oxide nanoparticles in a semiconductor fabrication facility. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene.* 2016; 13(11): 871–880.
- Brenner S.A., Neu-Baker N.M., Caglayan Cihan, Zurbenko I.G. Occupational exposure to airborne nanomaterials: An assessment of worker exposure to aerosolized metal oxide nanoparticles in a semiconductor fab and subfab. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene.* 2016; 13(9): D138–D147. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1183012>
- Соловьёва С.Н., Сутункова М.П., Кацнельсон Б.А. О критериях гигиенической оценки атмосферных концентраций промышленных аэрозолей с высоким содержанием наночастиц аморфного диоксида кремния. *Гигиена и санитария.* 2017; 96(12): 1179–81. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-12-1179-1181>
- Звездин В.Н., Землянова М.А., Акафьева Т.И. Токсичность аэрозоля нанодисперсного оксида марганца при ингаляционной экспозиции. *Мед. труда и пром. экол.* 2015; 12: 13–6.
- Ахальцева Л.В., Журков В.С., Ингель Ф.И. Мутагенная активность наноматериалов в тесте эймса. Обзор литературы. *Гигиена и санитария.* 2019; 98(11): 1309–20. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-11-1309-1320>
- Ахальцева Л.В., Журков В.С., Сычева Л.П., Савостикова О.Н., Алексеева А.В. Изучение мутагенной активности нано- и микрочастиц в тесте Эймса (*Salmonella*/микросомы). *Гигиена и санитария.* 2019; 98(4): 455–60. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-4-455-460>
- Сахаутдинова Р.Р., Сутункова М.П., Минигалиева И.А., Бушуева Т.В. Применение цитологического метода исследования мазков у экспериментальных животных для оценки токсического действия металлосодержащих наночастиц. *Гигиена и санитария.* 2020; 99(1): 120–4. <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-1-120-124>
- Землянова М.А., Зайцева Н.В., Игнатова А.М., Степанков М.С. Оценка реакции дыхательных путей на однократное интратрахеальное введение нано- и микроразмерных частиц оксида алюминия. *Гигиена и санитария.* 2019; 98(2):

- 196–202. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-196-202>
13. Сутункова М.П. Экспериментальное изучение токсического действия металлосодержащих наночастиц на предприятиях чёрной и цветной металлургии и оценка риска для здоровья работающих. *Гигиена и санитария*. 2017; 96(12): 1182–7. <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-12-1182-1187>
 14. El-Sheikh A., Salah S., Ameen S.H., Abdel-Fatah, Ibrahim H.M. The immunotoxic effects of short term chronic exposure to Titanium Dioxide Nanoparticles on spleen of adult albino rats and the role of after toxic effect follow up. *Ain Shams J Forensic Med Clin Toxicol*. 2016; 26: 115–28.
 15. Butler K.S., Peeler D.J., Casey B.J., Dair B.J., Elespuru R.K. Silver nanoparticles: correlating nanoparticle size and cellular uptake with genotoxicity. *Mutagenesis*. 2015; 30(4): 577–91. <https://doi.org/10.1093/mutage/gev020>
 16. Guo X., Li Y., Yan J., Ingle T., Jones M.Y., Mei N. et al. Size- and coatingdependent cytotoxicity and genotoxicity of silver nanoparticles evaluated using in vitro standard assays. *Nanotoxicology*. 2016; 10(9): 1373–84. <https://doi.org/10.1080/17435390.2016.1214764>
 17. Sadiq R., Khan Q.M., Mobeen A., Hashmat A.J. In vitro toxicological assessment of iron oxide, aluminium oxide and copper nanoparticles in prokaryotic and eukaryotic cell types. *Drug Chem Toxicol*. 2015; 38(2): 152–61. <https://doi.org/10.3109/01480545.2014.919584>
 18. Akyil D., Eren Y., Konuk M., Tepekozcan A., Sağlam E. Determination of mutagenicity and genotoxicity of indium tin oxide nanoparticles using the Ames test and micronucleus assay. *Toxicol Ind Health*. 2016; 32(9): 1720–8. <https://doi.org/10.1177/0748233715579804>
 19. Morais J.P.S., Rosa M.F., de Souza Filho M., Nascimento L.D., do Nascimento D.M., Cassales A.R. Extraction and characterization of nanocellulose structures from raw cotton linter. *Carbohydrate Polymers*. 2013; 91(1): 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.010>
 20. Whyte W., Agricola K., Derks M. Airborne particle deposition in cleanrooms: Relationship between deposition rate and airborne concentration. *Clean Air and Containment Review*. 2016; 25: 4–10

References

1. Lisetskaya L.G., Shayakhmetov S.F., Merinov A.V. Granulometric and morphologic analysis of suspended particles in the air of aluminum production. *Med. truda i prom. ekol*. 2017; 10: 50–3 (in Russian).
2. Zaitseva N.V., Ulanova T.S., Zlobina A.V., Volkova M.V., Gileva M.I. Investigations into nanoscale particles as part of industrial aerosols and particulate matter in the air of working area. *Toxicological Review*. 2017; (1): 20–26. (In Russ.) <https://doi.org/10.36946/0869-7922-2017-1-20-26>
3. Santos R.J., Vieira M.T. Assessment of airborne nanoparticles present in industry of aluminum surface treatments. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2017; 14(3): D29–D36. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1254782>
4. Curwin B., Bertke S. Exposure Characterization of Metal Oxide Nanoparticles in the Workplace. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2011; 8(10): 580–587. <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.613348>
5. Brenner S.A., Neu-Baker N.M., Eastlake A.C., Beaucham C.C., Geraci C.L. NIOSH field studies team assessment: Worker exposure to aerosolized metal oxide nanoparticles in a semiconductor fabrication facility. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2016; 13(11): 871–880.
6. Brenner S.A., Neu-Baker N.M., Caglayan Cihan, Zurbenko I.G. Occupational exposure to airborne nanomaterials: An assessment of worker exposure to aerosolized metal oxide nanoparticles in a semiconductor fab and subfab. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*. 2016; 13(9): D138–D147. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1183012>
7. Solovyeva S.N., Sutunkova M.P., Katsnelson B.A. Criteria for hygienic assessment of ambient air concentrations of industrial aerosols with a high content of amorphous silicon dioxide nanoparticles. *Gigiena i Sanitaria*. 2017; 96(12): 1179–813 (in Russian). <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-12-1179-1181>
8. Zvezdin V.N., Zemlyanova M.A., Akafieva T.I. Inhalation toxicity of nanodispersed manganese oxide aerosol. *Med. truda i prom. ekol*. 2015; 12: 13–6 (in Russian).
9. Akhaltseva L.V., Zhurkov V.S., Ingel F.I. Mutagenic activity of nanomaterials in the ames test. Literature review. *Gigiena i Sanitaria*. 2019; 98(11): 1309–20 (in Russian). <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-11-1309-1320>
10. Akhaltseva L.V., Zhurkov V.S., Sycheva L.P., Savostikova O.N., Alekseeva A.V. Study of mutagenic activity nano- and microparticles in the Ames test (salmonella/microsome). *Gigiena i Sanitaria*. 2019; 98(4): 455–60 (in Russian). <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-4-455-460>
11. Sakhautdinova R.R., Sutunkova M.P., Minigalieva I.A., Bushueva T.V. A cytological study of imprint smears (touch preparation cytology) to evaluate the toxicity of metal-containing nanoparticles in experimental animals. *Gigiena i Sanitaria*. 2020; 99(1): 120–4 (in Russian). <https://doi.org/10.33029/0016-9900-2020-99-1-120-124>
12. Zemlyanova M.A., Zaitseva N.V., Ignatova A.M., Stepankov M.S. Estimation of the response of respiratory tracts to a single intra-tracheal introduction of nano- and micro-sized particles of aluminum oxide. *Gigiena i Sanitaria*. 2019; 98(2): 196–202 (in Russian). <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-2-196-202>
13. Sutunkova M.P. Experimental studies of toxic effects of metallic nanoparticles at iron and nonferrous industries and risk assessment for workers' health. *Gigiena i Sanitaria*. 2017; 96(12): 1182–1187 (in Russian). <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-12-1182-1187>
14. El-Sheikh A., Salah S., Ameen S.H., Abdel-Fatah, Ibrahim H.M. The immunotoxic effects of short term chronic exposure to Titanium Dioxide Nanoparticles on spleen of adult albino rats and the role of after toxic effect follow up. *Ain Shams J Forensic Med Clin Toxicol*. 2016; 26: 115–28.
15. Butler K.S., Peeler D.J., Casey B.J., Dair B.J., Elespuru R.K. Silver nanoparticles: correlating nanoparticle size and cellular uptake with genotoxicity. *Mutagenesis*. 2015; 30(4): 577–91. <https://doi.org/10.1093/mutage/gev020>
16. Guo X., Li Y., Yan J., Ingle T., Jones M.Y., Mei N. et al. Size- and coatingdependent cytotoxicity and genotoxicity of silver nanoparticles evaluated using in vitro standard assays. *Nanotoxicology*. 2016; 10(9): 1373–84. <https://doi.org/10.1080/17435390.2016.1214764>
17. Sadiq R., Khan Q.M., Mobeen A., Hashmat A.J. In vitro toxicological assessment of iron oxide, aluminium oxide and copper nanoparticles in prokaryotic and eukaryotic cell types. *Drug Chem Toxicol*. 2015; 38(2): 152–61. <https://doi.org/10.3109/01480545.2014.919584>
18. Akyil D., Eren Y., Konuk M., Tepekozcan A., Sağlam E. Determination of mutagenicity and genotoxicity of indium tin oxide nanoparticles using the Ames test and micronucleus assay. *Toxicol Ind Health*. 2016; 32(9): 1720–8. <https://doi.org/10.1177/0748233715579804>
19. Morais J.P.S., Rosa M.F., de Souza Filho M., Nascimento L.D., do Nascimento D.M., Cassales A.R. Extraction and characterization of nanocellulose structures from raw cotton linter. *Carbohydrate Polymers*. 2013; 91(1): 229–35. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.010>
20. Whyte W., Agricola K., Derks M. Airborne particle deposition in cleanrooms: Relationship between deposition rate and airborne concentration. *Clean Air and Containment Review*. 2016; 25: 4–10