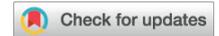


© Коллектив авторов, 2022

УДК 613.633:628.511



## Гигиеническая оценка средств индивидуальной защиты работников от воздействия технических наночастиц (систематический обзор)

А.В. Глушкова<sup>1</sup>, А.О. Карелин<sup>1</sup>, Г.Б. Еремин<sup>2</sup><sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова» Минздрава России, ул. Льва Толстого, д. 6–8, г. Санкт-Петербург, 197022, Российская Федерация<sup>2</sup> ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Роспотребнадзора 2-я Советская улица, д. 4, г. Санкт-Петербург, 191036, Российская Федерация

### Резюме

**Введение.** Производство и использование наноматериалов ежегодно дает значительный прирост, а с ними возрастает и риск для здоровья человека, особенно риск для персонала, контактирующего с наноматериалами, в том числе с наночастицами на рабочих местах. И если знания о потенциальной токсичности, связанной с нанотехнологиями, еще находятся на стадии накопления, то средства индивидуальной защиты при работе с наночастицами должны быть доступны сразу, в то время как другие более сложные стратегии управления рисками находятся на этапе разработки, оценки и последующего внедрения в практику.

**Цель:** обобщить и систематизировать сведения о используемых и предлагаемых к использованию средств индивидуальной защиты работников от воздействия технических наночастиц.

**Материалы и методы.** Использованы информационно-аналитические методы на основе обобщения и анализа современных научных исследований, опубликованных в реферативных базах данных Medline, PubMed, Scopus, а также информационных порталах по состоянию на январь 2022 г. Отбор статей осуществлялся по принципу наличия в них сведений о гигиенической оценке средств индивидуальной защиты работников от воздействия технических наночастиц. Было проанализировано более 528 оригинальных статей, и в результате был отобран 39 полнотекстовой материал, удовлетворяющих вышеуказанным критериям.

**Результаты.** Принципы, лежащие в основе сертификации фильтров, в частности по размеру проникающих наночастиц, не всегда соблюдаются при производстве фильтров и особенно при дальнейшей эксплуатации их на рабочих местах. Данные об использовании специальной защитной одежды очень ограничены и показывают, что доступные защитные средства могут не обеспечивать необходимый уровень защиты.

**Заключение.** Представленный обзор литературы выявил проблемы в нормативной базе и практическом осуществлении гигиенической оценки средств индивидуальной защиты от воздействия технических наночастиц, одной из которых является несоответствие между реальными производственными условиями и моделируемыми в лабораториях процессами. Исследователями были установлены факторы, влияющие на эффективность средств индивидуальной защиты органов дыхания от воздействия наночастиц: диаметр, заряд и форма частиц, скорость потока и влажность воздуха, модель и тип используемого фильтра.

**Ключевые слова:** наночастицы, средства индивидуальной защиты, нанотоксикология.

**Для цитирования:** Глушкова А.В., Карелин А.О., Еремин Г.Б. Гигиеническая оценка средств индивидуальной защиты работников от воздействия технических наночастиц (систематический обзор) // Здоровье населения и среда обитания. 2022. Т. 30. № 5. С. 86–93. doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-86-93>

### Сведения об авторах:

✉ Глушкова Анжела Викторовна – к.м.н., ассистент кафедры общей гигиены с экологией ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова» Минздрава России; e-mail: [angela\\_glushkova@yahoo.com](mailto:angela_glushkova@yahoo.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0433-8522>.

Карелин Александр Олегович – д.м.н., профессор, заведующий кафедрой общей гигиены с экологией ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. академика И.П. Павлова» Минздрава России; e-mail: [karelin52@mail.ru](mailto:karelin52@mail.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2467-7887>.

Еремин Геннадий Борисович – к.м.н.; руководитель отдела анализа рисков здоровью населения ФБУН «Северо-Западный научный центр гигиены и общественного здоровья» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; e-mail: [yeremin45@yandex.ru](mailto:yeremin45@yandex.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1629-5435>.

**Информация о вкладе авторов:** концепция и дизайн исследования: Еремин Г.Б.; сбор данных: Глушкова А.В.; анализ и интерпретация результатов: Глушкова А.В., Карелин А.О.; литературный обзор: Глушкова А.В.; подготовка рукописи: Глушкова А.В. Все авторы ознакомились с результатами работы и одобрили окончательный вариант рукописи.

**Соблюдение этических стандартов:** данное исследование не требует представления заключения комитета по биомедицинской этике или иных документов.

**Финансирование:** исследование не имело финансовой поддержки.

**Конфликт интересов:** авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов в связи с публикацией данной статьи.

Статья получена: 23.04.22 / Принята к публикации: 17.05.22 / Опубликована: 31.05.22

## Hygienic Assessment of Personal Protective Equipment for Workers Exposed to Engineering Nanoparticles: A Systematic Review

Angela V. Glushkova,<sup>1</sup> Alexander O. Karelin,<sup>1</sup> Gennadiy B. Yeremin<sup>2</sup><sup>1</sup> I.P. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6–8 Lev Tolstoy Street, Saint Petersburg, 197022, Russian Federation<sup>2</sup> North-West Public Health Research Center, 4, 2<sup>nd</sup> Sovetskaya Street, Saint Petersburg, 191036, Russian Federation

### Summary

**Background:** The production and use of nanomaterials keeps demonstrating a significant annual increase leading to enhanced health risks for humans and especially those exposed to nanoparticles at workplaces. While the knowledge of potential toxicity related to nanotechnologies is still evolving and other more sophisticated risk management strategies are being developed, evaluated and put into practice, personal protective equipment for those handling nanoparticles should be available immediately.

**Objective:** To summarize and systematize information about personal protective equipment already used and recommended for use by workers exposed to nanoparticles in the occupational setting.

**Materials and methods:** We used data analysis methods based on review and generalization of contemporary research data

found in Medline, PubMed, and Scopus abstract and citation databases and on information portals as of January 2022. The article selection criterion was availability of information about hygienic assessment of personal protective equipment for workers occupationally exposed to nanoparticles; having reviewed over 528 original articles, we chose 39 full-text publications.

**Results:** We established that the principles of certification of filters and their further use for protection against nanoparticles under industrial conditions are not always observed in the production of filters, especially in terms of their pore size. Data on the use of special protective clothing is very limited and shows that available protective equipment may not ensure the required level of protection.

**Conclusion:** This literature review has revealed problems in the regulatory framework and practical hygienic assessment of personal protective equipment against nanoparticles, one of which is the discrepancy between real working conditions and processes simulated in the laboratory. We have established that particle diameter, charge and shape, air flow rate and humidity, as well as the model and type of filters determine the efficiency of respiratory protective equipment used to protect workers against nanoparticles in the workplace air.

**Keywords:** nanoparticles, personal protective equipment (PPE), nanotoxicology.

**For citation:** Glushkova AV, Karelin AO, Yeregin GB. Hygienic assessment of personal protective equipment for workers exposed to engineering nanoparticles: A systematic review. *Zdorov'e Naseleniya i Sreda Obitaniya*. 2022;30(5):86–93. (In Russ.) doi: <https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-5-86-93>

#### Author information:

✉ Angela V. **Glushkova**, Cand. Sci. (Med.), Assistant, Department of General Hygiene with Ecology, I.P. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University; e-mail: [angela\\_glushkova@yahoo.com](mailto:angela_glushkova@yahoo.com); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0433-8522>.

Alexander O. **Karelin**, Dr. Sci. (Med.), Professor, Head of the Department of General Hygiene with Ecology, I.P. Pavlov First Saint Petersburg State Medical University; e-mail: [karelin52@mail.ru](mailto:karelin52@mail.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2467-7887>.

Gennadiy B. **Yeregin**, Cand. Sci. (Med.), Head of the Department of Public Health Risk Analysis, North-West Public Health Research Center; e-mail: [yeregin45@yandex.ru](mailto:yeregin45@yandex.ru); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1629-5435>.

**Author contributions:** study conception and design: *Yeregin G.B.*; data collection: *Glushkova A.V.*; analysis and interpretation of results: *Glushkova A.V., Karelin A.O.*; literature review: *Glushkova A.V.*; draft manuscript preparation: *Glushkova A.V.* All authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.

**Compliance with ethical standards:** Ethics approval was not required for this systematic review.

**Funding:** The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

Received: April 23, 2022 / Accepted: May 17, 2022 / Published: May 31, 2022

**Введение.** В нанометровом диапазоне частицы проявляют несколько иные химические и физические свойства, чем их микро- и макроаналоги. Так, например, наночастицы (НЧ) имеют низкую растворимость и высокую удельную площадь поверхности. НЧ также имеют тенденцию проявлять уникальные электромагнитные свойства. Обычно НЧ, связанные в жидкой или твердой среде, являются инертными [1].

Несвязанные НЧ могут попасть в организм при вдыхании, через кожу или при проглатывании. В профессиональных условиях ингаляционный путь является ведущим путем поступления НЧ в организм человека. НЧ способны проникать глубоко в легкие, именно туда, где происходит газообмен [2]. Проникновение НЧ через незащищенные участки кожи или слизистую глаз является на сегодня достаточно актуальной проблемой. Пероральный путь поступления НЧ в организм человека имеет второстепенное значение, особенно при условии соблюдения правил личной гигиены [3]. В связи с этим разработка и использование эффективных средств индивидуальной защиты (СИЗ) органов дыхания, кожи и глаз работников от воздействия технических НЧ актуальны и имеют важное значение для сохранения их здоровья.

**Цель работы** — проведение гигиенической оценки используемых и предлагаемых к использованию СИЗ работников от воздействия технических наночастиц на основе выполненного систематического литературного обзора.

**Материалы и методы.** Использованы информационно-аналитические методы на основе обобщения и анализа современных научных исследований, опубликованных в реферативных базах данных Medline, PubMed, Scopus по состоянию на январь 2022 г. Отбор статей проводился по ключевым словам: наночастицы, технические наночастицы, средства индивидуальной защиты и осуществлялся по принципу наличия в них сведений о гигиенической оценке средств индивидуальной защиты работников от воздействия

технических наночастиц. Было проанализировано более 528 оригинальных статей, и в результате было отобрано 40 полнотекстовых материалов, удовлетворяющих критериям включения: для оригинальных статей и интернет-ресурсов, в том числе международных и региональных директив и нормативных регламентов, были публикации с описанием физико-химических характеристик и токсикологических свойств наночастиц, способов их получения, дизайна токсикологических экспериментов, характеристик СИЗ.

**Результаты.** Несмотря на то что имеется незначительное количество данных о потенциальных последствиях воздействия НЧ на здоровье человека, в научно-методической литературе прослеживается определенная причинно-следственная связь между воздействием НЧ и их негативными эффектами на здоровье человека. В связи с этим было важно оценить подверженность персонала неблагоприятному воздействию НЧ и предопределить будущие проблемы в отраслях, где используются наноматериалы.

В ходе изучения механизмов токсичности НЧ исследователями были выделены три основных пути их воздействия на организм человека [4]. Доминирующим и наиболее изученным является ингаляционный путь. НЧ диаметром от 10 до 100 нм обнаруживаются в альвеолах, в то время как микрочастицы задерживаются в верхних отделах дыхательных путей [5, 6]. При вдыхании НЧ проникают в кровь и лимфу [4].

Проникновение НЧ через кожу долгое время недооценивалось из-за распространенного мнения о том, что кожа представляет для них непроницаемый барьер. Тем не менее последние исследования все чаще демонстрируют способность НЧ проникать вглубь кожи даже через неповрежденные участки [6], а также через поры и волосяные фолликулы. Ряд исследований указывает на то, что пот также потенциально увеличивает вероятность перкутанного проникновения НЧ. Далее НЧ распространяются по лимфатической системе [5].

В качестве третьего пути проникновения НЧ в организм человека указывают желудочно-кишечный тракт. Поступление НЧ может происходить при непосредственном проглатывании НЧ или при опосредованном глотании НЧ после вдыхания [5]. При этом только небольшая часть проглоченных НЧ может быстро выводиться из организма [4].

Еще один путь проникновения НЧ в организм человека, который может иметь отношение к гигиене труда и технике безопасности, — это прямое попадание НЧ в кровоток, например через открытую рану после пореза или травмы. В этом случае вероятность накопления НЧ в организме очень высока как по количеству НЧ, так и по продолжительности их нахождения в организме человека [4]. Могут также существовать дополнительные альтернативные пути проникновения НЧ в организм человека, например через слизистую оболочку глаза.

Учитывая имеющиеся на сегодня доказательства токсичности НЧ, настоятельно рекомендуется соблюдать меры предосторожности при работе с данными веществами. Например, группа экспертов из Французского агентства по безопасности окружающей среды и гигиене труда недавно разработала рекомендации, согласно которым НЧ должны рассматриваться как вещества с неизвестным уровнем опасности, поэтому и работы с ними должны проводиться с соблюдением всех мер предосторожности, которые соблюдаются при работе с опасными материалами [5].

Для достижения наилучших результатов при взаимодействии НЧ и персонала и минимизации негативных эффектов необходимо использовать следующие превентивные меры:

- технологические: местная вытяжная вентиляция, фильтрация выхлопных газов, использование НЧ в виде суспензии, а не в виде сухого вещества;

- административные: ограничение доступа работникам в рабочие зоны, где возможен контакт с НЧ [8].

Во всем мире существуют правила гигиены и охраны труда, гарантирующие безопасность персонала. Наиболее строгие из них, налагающие ответственность за обеспечение безопасности рабочих мест на работодателя, имеют место в США [8] и Канаде [9].

Однако в настоящее время ни одно из этих регулирующих правил не включает нанотехнологический аспект [10], даже несмотря на интенсивные усилия в этом направлении Рабочей группы по техническим наноматериалам в рамках Организации экономического сотрудничества и развития [11]. Так, например, Европейский регламент REACH не требует регистрации нановеществ, выпускаемых на рынок производителем менее 1 тонны/год [12]. Аналогичная ситуация наблюдается и в Канаде [13].

Интегрированная структура управления рисками для НЧ и наноматериалов была предложена на основе схем, разработанных в Японии, Европе и США [14]: она опирается на принятие международных стандартов тестирования токсичности веществ и общих методологий оценки риска, включая в себя оценку риска, управление рисками, формирование вариантов политики управления рисками, информирование о рисках.

Для компенсации отсутствия установленных государственных профессиональных указаний по

охране труда и окружающей среды, касающихся НЧ, несколько частных и общественных организаций разработали свои собственные руководства, базируясь на передовом опыте безопасного использования НЧ в условиях промышленного производства [15, 16]. Ими было рекомендовано использование респираторов с фильтрующей лицевой частью и защитной одежды, а также фильтрующих респираторов с принудительной подачей воздуха для снижения риска проникновения НЧ в пространство между лицом и респиратором.

СИЗ являются последней линией защиты и используются в тех ситуациях, когда вышеописанные превентивные меры неосуществимы или неэффективны. СИЗ также могут быть использованы в сочетании с другими методами профилактики воздействия НЧ на работников.

Выбор СИЗ должен основываться на многих факторах, таких как химическая идентичность и токсикологическая характеристика НЧ; концентрация НЧ в воздухе рабочей зоны, их физическое состояние (например, сухой порошок или жидкая суспензия); наличие иных средств профилактики воздействия НЧ на здоровье персонала.

СИЗ могут обеспечивать защиту только в том случае, если они правильно выбраны, соответствующим образом хранятся, обрабатываются и эксплуатируются во время всех возможных воздействий.

Без установленных пределов профессионального воздействия эффективность СИЗ по отношению к НЧ может оцениваться только в отношении «относительной» эффективности (например, при оценке процента проникновения НЧ или процента снижения их негативного воздействия) [17].

Учитывая, что данные о токсичности и эффективности методов контроля риска здоровью от воздействия НЧ в полном объеме отсутствуют, эффективные СИЗ должны быть доступны везде в качестве постоянного или временного инвентария [16]. При этом приоритетное значение имеют СИЗ для защиты дыхательных путей (респираторы) и кожи (защитные перчатки и костюмы)

Далее мы рассмотрим несколько видов СИЗ, используемых при работе с НЧ.

**Респираторы.** Защита органов дыхания, используемая как часть полной программы защиты здоровья персонала, должна быть включена в план управления рисками при любом сценарии работы с НЧ.

Недавние исследования показывают, что различные типы респираторов (например, лицевая маска, высокоэластичная полумаска, высокоэластичная маска, лицевая часть в виде маски, лицевая маска с принудительной подачей воздуха или автономный дыхательный аппарат) могут обеспечить необходимую защиту от находящихся в воздухе НЧ.

В ряде исследований изучалась эффективность респираторов для минимизации воздействия НЧ на здоровье персонала [17]. В целом было обнаружено, что фильтрующий материал респиратора эффективно улавливает НЧ, в основном за счет диффузии и действия электростатических сил. Исследования, касающиеся эффективности фильтра для мельчайших НЧ (< 2 нм), продолжаются, но на сегодня ясно, что подсос является более вероятной причиной вдыхания НЧ, нежели

проникновение их через фильтрующую среду респиратора.

Не так давно был опубликован отчет с рекомендациями по использованию СИЗ на основе испытаний, проведенных с НЧ в рамках европейского проекта NanoSafe 2 [16], в котором авторы утверждают, что HEPA-фильтры, респираторные картриджи и маски, выполненные из волокнистых фильтров, более эффективны при работах с НЧ, чем с их микро- и макроаналогами.

Использование СИЗ для защиты органов дыхания представляет собой строго регламентированную область. В Национальном институте безопасности и гигиены труда (NIOSH) (США) проводились исследования с респираторами, которые тестировались на способность проникновения средней аэродинамической массы с диаметром частиц до 300 нм. НЧ данного диаметра были выбраны, потому как они являются наиболее проникаемыми в легкие [18].

Выбор респиратора должен основываться на оценке экспозиции НЧ и анализе риска. Необходимо учитывать несколько параметров, в том числе химические свойства НЧ, их токсичность и концентрацию, уровень физической активности персонала и время ношения респиратора. Тем не менее данные по токсичности НЧ все еще весьма скудны [19], что сильно ограничивает возможности рационального процесса отбора респираторов.

В результате Национальным институтом безопасности и гигиены труда (США) были одобрены два типа устройств для защиты органов дыхания от воздействия НЧ [20].

Фильтрующие респираторы, которые включают фильтрацию с респиратором и лицевой маской, доступны в трех категориях (N, R и P) в зависимости от их устойчивости к деградации наночастиц. Они делятся на три типа (95, 99 и 100) в зависимости от минимального уровня эффективной фильтрации (95, 99 и 99,97 % соответственно) [21].

Фильтры серии N могут быть использованы при работе без нефтесодержащих частиц. Фильтры серий R и P могут быть использованы при работе с частицами нефти. Использование фильтров серии R может быть ограничено рабочей сменой [22].

Вторым классом устройств, одобренных NIOSH, являются изолирующие респираторы с принудительной подачей воздуха, которые состоят из лицевой маски и системы подачи воздуха. Они являются существенной альтернативой фильтрующим респираторам, например, в случае исполь-

зования их в условиях обедненной кислородом атмосферы, при ношении бороды или усов и в связи с ограничением по времени из-за сопротивления дыхания.

В связи с отсутствием стандартных диагностических методик, специфичных для НЧ, исследователи разработали свои собственные измерительные установки для оценки эффективности используемых фильтров и респираторов.

Как правило, они состоят из четырех основных компонентов: системы генерации аэрозоля, испытательной камеры, счетчика частиц и флоуметра. Принцип измерения схематично показан на рисунке.

Система генерации может включать камеру для производства НЧ [23] с сопутствующими принадлежностями (эксикатор, нейтрализатор скорости осаждения). Дифференциальный анализатор подвижности, сканирующий мобильный измеритель частиц или электростатический сепаратор могут быть добавлены для первоначального отбора частиц в зависимости от их размера [24].

После генерации НЧ поступают непосредственно в испытательную камеру. В то время как большинство исследователей для тестирования использовали лишь фильтры, некоторые оценивали работу респираторов в целом. В ряде случаев респиратор помещался в коробку из плексигласа и запечатывался расплавленным воском [25].

В других – респиратор герметично закреплялся с помощью силиконового герметика на лице манекена [26, 27].

Система подсчета частиц и флоуметр располагаются ниже. Боковой фильтр позволяет измерять концентрацию частиц выше потока. Эффективность фильтра определяется как соотношение между концентрациями частиц ниже и выше потока.

В некоторых случаях были использованы интегрированные системы, объединяющие образование и измерение проникновения аэрозоля [28].

Несколько типов HEPA-фильтров, а также ULPA-фильтров (для воздуха, загрязненного ультрамелкими частицами) были испытаны с НЧ графита при скорости потока 9,6 см/с, которые показали увеличение способности проникновения НЧ при уменьшении диаметра со 100 до 10 нм, достигая значения около 1 % при размере НЧ в 100 нм [29].

Было показано, что полиакрилнитрильный волокнистый фильтр с толщиной волокна 0,02 мм имел даже лучшую эффективность фильтрации, чем HEPA-фильтр при испытаниях с НЧ NaCl при скорости потока 5,3 см/с [30].

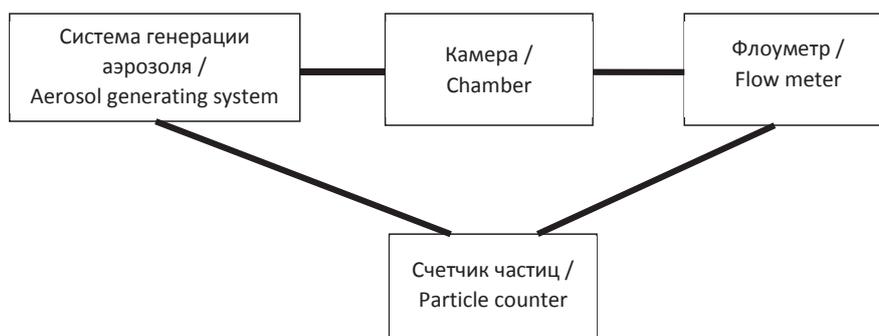


Рисунок. Типовая установка для измерения эффективности фильтрации для НЧ  
Figure. Typical installation for nanoparticle filtration efficiency testing

FPP3 фильтр (эффективность фильтрации 98 %) при испытаниях со скоростью потока 5,3 см/с с НЧ графита продемонстрировал максимум проникновения — около 0,1 % НЧ с размером 30 нм [28]. Стекловолоконные фильтры также при испытаниях демонстрировали возрастающее проникновение НЧ NaCl и Ag при скорости потока 5,3 см/с [29].

E-PTFE мембраны из вспененного политетрафторэтилена, который по своей структуре имеет наноразмерные поры, в исследованиях демонстрировали такие же свойства, как и предыдущие фильтры, при исследовании проникновения через них НЧ с размером 10–20 нм, и наблюдалось максимальное проникновение при размере частиц в 30 нм [31].

Кроме того, наблюдалось проникновение НЧ NaCl через противопылевые респираторы с фильтрующей лицевой частью при скорости потока 30 и 85 л/мин [29]. Была достигнута эффективность защиты для некоторых протестированных моделей более 96 %.

Авторы ряда исследований пришли к выводу, что HEPA-фильтры и волокнистые фильтры в целом демонстрируют достаточно высокую эффективность в плане защиты органов дыхания от неблагоприятного воздействия НЧ [30].

Следует отметить, что, несмотря на одну и ту же модель или тип используемого фильтра, эффективность респираторов зависела от конкретного производителя [32]. Например, в эксперименте серию из пяти респираторов N95 от разных производителей обрабатывали НЧ NaCl при скорости потока 85 л/мин [33]. Максимальные значения проникновения НЧ варьировали в диапазоне от менее 2 до более 5 % [29].

Существует еще один фактор, который влияет на максимальное значение проникновения НЧ: скорость потока частиц. Высокие скорости потока сильно снижают эффективность фильтрации в диапазоне диаметра НЧ от 3 до 300 нм [31, 32]. Оказалось также, что высокие скорости потока препятствуют диффузионному механизму проникновения НЧ и способствуют увеличению инерционного удара [33].

Этот показатель весьма важен, так как скорость потока 85 л/мин, используемая в тестировании при стандартных методах защиты органов дыхания, крайне низка по сравнению с максимальной скоростью вдыхаемого воздуха 300–400 л/мин, измеренной у рабочих, выполняющих физическую работу высокой интенсивности.

К другим параметрам, влияющим на проникновение НЧ через фильтры и респираторы, относятся заряд и форма частиц [34], заряд фильтра [35], а также условия хранения и использования респираторов [36].

При изучении влияния влажности на способность проникновения НЧ было отмечено, что повышение способности проникновения НЧ через фильтры наблюдалось для электростатических фильтров [31], в то время как для стекловолоконных фильтров такой зависимости выявлено не было при уровне влажности от 10 до 23 000 ppm по массе [32]. Это отчасти объясняется снижением заряда электростатических фильтров, вызванным влажностью.

**Защитная одежда.** Если в отношении защиты органов дыхания достигнут определенный про-

гресс, то в отношении защиты кожных покровов от проникновения НЧ успехи исследователей намного скромнее.

В отсутствие стандартных методов исследований, предназначенных для изучения защитных свойств одежды от неблагоприятного воздействия НЧ, исследователи разработали свои собственные измерительные установки для воздухопроницаемых материалов, таких как ткани. Эти установки, как правило, аналогичны стандартным для фильтрующих устройств защиты органов дыхания [35] и работают на основе того же принципа, который показан на рисунке. Поток аэрозольных НЧ проходит через систему, и их концентрация на обеих сторонах образца измеряется с использованием стандартных методов подсчета частиц.

В случае работы с пористыми тканями и непористыми образцами, например защитными перчатками из монолитного полимера, использовали конденсационный счетчик частиц [37].

Другие исследователи, работающие с текстильными и эластомерными защитными перчатками, использовали сканирующую электронную микроскопию (SEM) для визуализации поведения НЧ на поверхности образцов после статического или динамического контакта [37].

Эксперименты проводились с проницаемым текстилем с использованием олеиновой кислоты и аэрозолей KCl с размером частиц от 15 до 3 мкм при различных скоростях потока [37]. Было установлено, что проникновение через ткань зависит от диаметра частиц. Тесты, выполненные с использованием аэрозолей NaCl со скоростью потока 10 и 32 л/мин на образцах, взятых из различных защитных тканей, показали аналогичную картину проникновения НЧ при сравнении с волокнистыми фильтрами со значениями до 100 нм.

Значения максимального проникновения аэрозоля были выявлены на уровне до 80 %. Эффект скорости потока, измеренный на образцах защитной одежды с использованием НЧ NaCl, согласовывается с теорией фильтрации, которая гласит, что более при высоких скоростях потока наблюдается увеличение проникновения НЧ и уменьшение эффективности MPPS [36].

Таким образом, одежду для химзащиты следует выбирать с учетом тех НЧ, с которыми приходится работать, а также с учетом рисков воздействия НЧ на здоровье человека. В некоторых ситуациях (малоопасный материал, низкий риск воздействия), использование хлопчатобумажных или хлопкополиэфирных лабораторных халатов или комбинезонов может обеспечить достаточную защиту. Для ситуаций с более высокой степенью риска (материал с высокой степенью опасности или высокий потенциал воздействия НЧ на здоровье человека) одежда должна быть изготовлена из тканей с низкой степенью удержания/выделения пыли. Нетканый текстиль (например, полиэтилен воздухонепроницаемый высокой плотности) может обеспечить высокий уровень защиты.

Рекомендуется избегать использования защитной одежды из шерсти, хлопка и других материалов (например, полиэстера) для работы с наноматериалами, вызывающими особую обеспокоенность. Обычные типы одежды для химзащиты при работе, например, с порошками включают лабораторный халат с длинными рукавами без манжет, длинные брюки без манжет, комбинезон,

туфли с закрытым носком из материала с низкой проницаемостью и бахилы.

В ряде исследований различные типы тканых и нетканых текстильных материалов подвергали воздействию НЧ графита в условиях отсутствия потока. Наблюдалось более чем 1000-кратное снижение потока частиц при использовании нетканых материалов на основе полиэтилена Tyvek® по сравнению с хлопком и полипропиленовыми неткаными образцами, даже если они имели гораздо меньшую толщину [35].

**Перчатки.** Для многих задач при работе с НЧ требуются хорошего качества одноразовые полимерные перчатки (например, из неопрена, нитрила, латекса или другого химически стойкого материала).

Как и в других ситуациях, связанных с химическим воздействием, перчатки должны быть выбраны с точки зрения их эффективности по отношению к характеристикам НЧ. В случае суспендирования в жидкости необходимо учитывать сопротивление материала перчаток как к НЧ, так и к жидкостям.

Толщина перчаток также способствует эффективности их использования. Проникновение НЧ становится наиболее вероятным, если перчатки подвергаются многократной механической деформации и если НЧ присутствуют в коллоидных растворах. Перчатки типа рукавиц или с удлиненной манжетой могут защищать запястья от воздействия НЧ за счет зазора между рукавом защитной одежды и перчаткой.

Исследования хлопковых перчаток с помощью сканирующей электронной микроскопии после статического и динамического контакта с глиной и НЧ оксида алюминия показали высокую вероятность проникновения частиц между волокнами [37].

Весьма немного результатов было получено для непористых мембранных материалов, которые использовались для защитных перчаток. В эксперименте, проведенном с пятью моделями перчаток, выполненными из резины, нитрила, латекса, неопрена и винила, с использованием аэрозольных НЧ графита в установке без потока, значения коэффициента диффузии близкие к нулю были зарегистрированы для НЧ размером 30 нм, а для НЧ размером 80 нм значения варьировались от  $5 \times 10^{-12}$  до  $4 \times 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с [29].

Полученные данные показали, что измеренный коэффициент диффузии для НЧ зависит как от материала, из которого были выполнены перчатки, так и от производителя. Исследования с использованием сканирующей электронной микроскопии проводились на латексных и нитрильных перчатках после статического и динамического контакта с НЧ глины и глинозема. Результаты показали, что НЧ имеют тенденцию накапливаться внутри микропор на поверхности перчаток. Степень накопления зависит от материала перчаток, типа НЧ и вида взаимодействия (статический или динамический).

Некоторые исследователи разделяют мнение, что имеющаяся в настоящее время защитная одежда т обеспечивает лишь ограниченную защиту от проникновения НЧ [37].

Достаточно легко НЧ проникают через волокна различных тканей, как воздухопроницаемых, так и воздухо непроницаемых [33]. Это открытие довольно тревожно, так как хлопок достаточно

часто (более чем в 25 % случаев) рекомендуется как лабораторный материал от компаний, занимающихся нанотехнологиями [32].

С другой стороны, полиэтиленовые нетканые материалы типа Tyvek® показали намного лучшую эффективность по сравнению с хлопковыми тканями. Для лучшей защиты исследователи предлагают носить полиэтиленовые нетканые перчатки в два слоя при контакте с НЧ [36]. Некоторые исследователи пришли к выводу, что наблюдается увеличение проникновения НЧ через защитную одежду с уменьшением размера частиц и скорости потока. Более высокие значения коэффициента диффузии зарегистрированы для НЧ графита размером 30 нм, чем для НЧ графита размером 80 нм (Best Body).

**Защита глаз.** Рекомендуется использовать специальные очки для предотвращения попадания НЧ в глаза в том случае, если используются респираторы без полной лицевой маски. При высокой вероятности воздействия НЧ на орган зрения (например, при распространении НЧ в воздухе) рекомендуется использовать плотно прилегающие пыленепроницаемые защитные очки [38–40].

**Заключение.** Таким образом, представленный обзор литературы выявил проблемы в нормативной базе и практическом осуществлении гигиенической оценки СИЗ от воздействия технических НЧ, одной из которых является несоответствие между реальными производственными условиями и моделируемыми в лабораториях процессами. Исследователями были установлены факторы, влияющие на эффективность СИЗ органов дыхания от воздействия НЧ: диаметр, заряд и форма частиц, скорость потока воздуха, влажность воздуха, модель и тип используемого фильтра, фирма-производитель. Для защиты рук лучше использовать перчатки из полиэтиленовых нетканых материалов. Что касается вопросов использования защитной специальной одежды, данные очень ограничены и показывают, что доступные защитные средства могут не обеспечивать необходимый уровень защиты. Это свидетельствует о том, что требуется гораздо больше усилий, в частности с точки зрения разработки соответствующих методов тестирования, сертификации существующих продуктов и понимания механизмов взаимодействия используемых в СИЗ материалов с НЧ.

#### Список литературы

1. Riviere JE. Pharmacokinetics of nanomaterials: an overview of carbon nanotubes, fullerenes and quantum dots. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol.* 2009;1(1):26–34. doi: 10.1002/wnan.24
2. Wohlfart S, Gelperina S, Kreuter J. Transport of drugs across the blood-brain barrier by nanoparticles. *J Control Release.* 2012;161(2):264–273. doi: 10.1016/j.jconrel.2011.08.017
3. Buzea C, Pacheco II, Robbie K. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases.* 2007;2(4):MR17–71. doi: 10.1116/1.2815690
4. Papp T, Schiffmann D, Weiss D, Castranova V, Vallyathan V, Rahman Q. Human health implications of nanomaterial exposure. *Nanotoxicology.* 2018;2(1):9–27. doi: 10.1080/17435390701847935
5. Virji MA, Stefaniak AB. A review of engineered nanomaterial manufacturing processes and associated exposures. In: Bassim N, ed. *Comprehensive Materials Processing.* Atlanta, GA: Elsevier Ltd; 2014:103–125.
6. Oberdörster G, Stone V, Donaldson K. Toxicology of nanoparticles: A historical perspective. *Nanotoxicology.* 2007;1(1):2–25. doi: 10.1080/17435390701314761

7. Ryman-Rasmussen JP, Riviere JE, Monteiro-Riviere NA. Penetration of intact skin by quantum dots with diverse physicochemical properties. *Toxicol Sci.* 2006;91(1):159-165. doi: 10.1093/toxsci/kfj122
8. Dunn KH, Topmiller JL, McCleery T, Whalen J. *Protecting Workers during Nanomaterial Reactor Operations*. DHHS (NIOSH) Publication No. 2018-120. doi: 10.26616/NIOSH PUB2018120
9. Tyshenko MG, Krewski D. A risk management framework for the regulation of nanomaterials. *Int J Nanotechnol.* 2008;5(1):143-160. doi: 10.1504/IJNT.2008.016553
10. *Working Party on Manufactured Nanomaterials. Current Developments/Activities on the Safety of Manufactured Nanomaterials/Nanotechnologies: Tour de Table at the 4th Meeting of the WPMN, Paris, France, June 11-13, 2008*. Accessed January 21, 2022. <https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono%282008%2929&doclanguage=en>
11. Substances chimiques: redevances réduites pour les PME. REACH. 2010. Accessed December 20, 2021. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/IP\\_10\\_594](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/IP_10_594)
12. Government of Canada New Substances Notification Regulations (Chemicals and Polymers), SOR/2005-247. Accessed December 20, 2021. <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/Regulations/SOR-2005-247/FullText.html>
13. Conti JA, Killpack K, Gerritzen G, et al. Health and safety practices in the nanomaterials workplace: results from an international survey. *Environ Sci Technol.* 2008;42(9):3155-62. doi: 10.1021/es702158q
14. Schulte P, Geraci C, Zumwalde R, Hoover M, Kuempel E. Occupational risk management of engineered nanoparticles. *J Occup Environ Hyg.* 2008;5(4):239-249. doi: 10.1080/15459620801907840
15. Golanski L, Guillot A, Tardif F. Safe Production and Use of Nanomaterials. Are Conventional Protective Devices such as Fibrous Filter Media, Cartridge for Respirators, Protective Clothing and Gloves also Efficient for Nanoaerosols? Nano-Safe: European Strategy for Nanosafety. Dissemination Report DR-325/326-200801-1, Jan 2008. Accessed May 30, 2022. [https://nanopinion.archiv.zsi.at/sites/default/files/dr1\\_s.pdf](https://nanopinion.archiv.zsi.at/sites/default/files/dr1_s.pdf)
16. Bollinger N. NIOSH Respirator Selection Logic. DHHS (NIOSH) Publication No. 2005-100. Cincinnati, OH; 2004. Accessed December 20, 2021. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-100/pdfs/2005-100.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB2005100>
17. NIOSH Respiratory Protective Devices, 42 CFR Part 84, 2009. Accessed January 17, 2022. <https://www.cdc.gov/niosh/nppt/topics/respirators/pt84abs2.html>
18. Distrimed Masques de filtration FFP2 et FFP3, 2007. Accessed January 17, 2022. [http://www.distrimed.com/acatalog/fp\\_gm\\_masques\\_ffp2\\_ffp3.html](http://www.distrimed.com/acatalog/fp_gm_masques_ffp2_ffp3.html)
19. Kim SC, Harrington MS, Pui DYH. Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media *J Nanopart Res.* 2007;9(1):117-125. doi: 10.1007/s11051-006-9176-4
20. Rengasamy S, Eimer BC. Nanoparticle penetration through filter media and leakage through face seal interface of N95 filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg.* 2012;56(5):568-580. doi: 10.1093/annhyg/mer122
21. Rengasamy S, King WP, Eimer BC, Shaffer RE. Filtration performance of NIOSH-approved N95 and P100 filtering facepiece respirators against 4 to 30 nanometer-size nanoparticles. *J Occup Environ Hyg.* 2008;5(9):556-564. doi: 10.1080/15459620802275387
22. *NIOSH Approaches to Safe Nanotechnology: Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials*. DHHS (NIOSH) Publication No. 2009-125. Accessed January 12, 2022. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf>
23. Yun KM, Hogan Jr CJ, Matsubayashi Y, Kawabe M, Iskandar F, Okuyama K. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers. *Chem Eng Sci.* 2007;62(17):4751-4759. doi: 10.1016/j.ces.2007.06.007
24. Jung SJ, Mehta JS, Tong L. Effects of environment pollution on the ocular surface. *Ocul Surf.* 2018;16(2):198-205. doi: 10.1016/j.jtos.2018.03.001
25. Dolez PI, Bodila N, Lara J, Truchon G. Personal protective equipment against nanoparticles. *Int J Nanotechnol.* 2010;7(1):99-117. doi: 10.1504/IJNT.2010.029550
26. NIOSH. *Workplace Design Solutions: Protecting Workers during the Handling of Nanomaterials*. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2018-121. Accessed January 12, 2022. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2018-121/default.html>
27. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *2016 TLVs and BEIs: Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices*. Cincinnati, OH: ACGIH; 2016. Accessed January 12, 2022. <https://www.acgih.org/forms/store/ProductFormPublic/2016-tlvs-and-beis>
28. Tsang MP, Kikuchi-Uehara E, Sonnemann GW, Aymonier C, Hirao M. Evaluating nanotechnology opportunities and risks through integration of life-cycle and risk assessment. *Nat Nanotechnol.* 2017;12(8):734-739. doi: 10.1038/nnano.2017.132
29. Pietroiusti A, Stockmann-Juvala H, Lucaroni F, Savolainen K. Nanomaterial exposure, toxicity, and impact on human health. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol.* 2018;10(5):e1513. doi: 10.1002/wnan.1513
30. Podgórski A, Bałazy A, Trzeciak TM. Modelling the deposition of fractal-like aggregates. *J Aerosol Sci.* 2004;35(Suppl 1):203-250. doi: 10.1016/j.jaerosci.2004.06.065
31. Shvedova AA, Kisin ER, Mercer R, et al. Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol.* 2005;289(5):L698-L708. doi: 10.1152/ajplung.00084.2005
32. Bello D, Wardle BL, Yamamoto N, et al. Exposure to nanoscale particles and fibers during machining of hybrid advanced composites containing carbon nanotubes. *J Nanoparticle Res.* 2009;11(1):231-249. doi: 10.1007/s11051-008-9499-4
33. Vinches L, Testori N, Dolez P, Perron G, Wilkinson KJ, Halli S. Experimental evaluation of the penetration of TiO2 nanoparticles through protective clothing and gloves under conditions simulating occupational use. *Nanoscience Methods.* 2013;2(1):1-15. doi: 10.1080/21642311.2013.771840
34. Bennat C, Müller-Goymann CC. Skin penetration and stabilization of formulations containing microfine titanium dioxide as physical UV filter. *Int J Cosmet Sci.* 2000;22(4):271-283. doi: 10.1046/j.1467-2494.2000.00009.x
35. Via R, Ostiguy C, Bennie J, et al. *Canadian Standards Association (CSA) Z12885-12: Nanotechnologies – Exposure Control Program for Engineered Nanomaterials in Occupational Settings*. CSA; 2012.
36. Rivero PJ, Urrutia A, Goicoechea J, Arregui FJ. Nanomaterials for functional textiles and fibers. *Nanoscale Res Lett.* 2015;10(1):501. doi: 10.1186/s11671-015-1195-6
37. Zhu S, Gong L, Li Y, Xu H, Gu Z, Zhao Y. Safety assessment of nanomaterials to eyes: An important but neglected issue. *Adv Sci (Weinh).* 2019;6(16):1802289. doi: 10.1002/advs.201802289
38. Abulikemu M, Tabrizi BEA, Ghobadloo SM, Mofarah HM, Jabbour GE. Silver nanoparticle-decorated personal protective equipment for inhibiting human coronavirus infectivity. *ACS Appl Nano Mater.* 2022;5(1):309-317. doi: 10.1021/acsnm.1c03033
39. Dolez PI, Bodila N, Lara J, Truchon G. Personal protective equipment against nanoparticles. *Int J Nanotechnol.* 2010;7(1):99-117. doi: 10.1504/IJNT.2010.029550
40. EU-OSHA. *E-fact 72: Tools for the Management of Nanomaterials in the Workplace and Prevention Measures*. June 19, 2013. Accessed January 12, 2022. <https://osha.europa.eu/en/publications/e-fact-72-tools-management-nanomaterials-workplace-and-prevention-measures>

## References

1. Riviere JE. Pharmacokinetics of nanomaterials: an overview of carbon nanotubes, fullerenes and quantum dots. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobiotechnol.* 2009;1(1):26-34. doi: 10.1002/wnan.24
2. Wohlfart S, Gelperina S, Kreuter J. Transport of drugs across the blood-brain barrier by nanoparticles. *J Control Release.* 2012;161(2):264-273. doi: 10.1016/j.jconrel.2011.08.017
3. Buzea C, Pacheco II, Robbie K. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases.* 2007;2(4):MR17-71. doi: 10.1116/1.2815690
4. Papp T, Schiffmann D, Weiss D, Castranova V, Vallyathan V, Rahman Q. Human health implications of

- nanomaterial exposure. *Nanotoxicology*. 2018;2(1):9–27. doi: 10.1080/17435390701847935
5. Virji MA, Stefaniak AB. A review of engineered nanomaterial manufacturing processes and associated exposures. In: Bassim N, ed. *Comprehensive Materials Processing*. Atlanta, GA: Elsevier Ltd; 2014:103–125.
  6. Oberdörster G, Stone V, Donaldson K. Toxicology of nanoparticles: A historical perspective. *Nanotoxicology*. 2007;1(1):2–25. doi: 10.1080/17435390701314761
  7. Ryman-Rasmussen JP, Riviere JE, Monteiro-Riviere NA. Penetration of intact skin by quantum dots with diverse physicochemical properties. *Toxicol Sci*. 2006;91(1):159–165. doi: 10.1093/toxsci/kfj122
  8. Dunn KH, Topmiller JL, McCleery T, Whalen J. *Protecting Workers during Nanomaterial Reactor Operations*. DHHS (NIOSH) Publication No. 2018-120. doi: 10.26616/NIOSH PUB2018120
  9. Tyshenko MG, Krewski D. A risk management framework for the regulation of nanomaterials. *Int J Nanotechnol*. 2008;5(1):143–160. doi: 10.1504/IJNT.2008.016553
  10. *Working Party on Manufactured Nanomaterials. Current Developments/Activities on the Safety of Manufactured Nanomaterials/Nanotechnologies: Tour de Table at the 4th Meeting of the WPMN, Paris, France, June 11–13, 2008*. Accessed January 21, 2022. <https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=env/jm/mono%282008%2929&doclanguage=en>
  11. Substances chimiques: redevances réduites pour les PME. REACH. 2010. Accessed December 20, 2021. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/IP\\_10\\_594](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/IP_10_594)
  12. Government of Canada New Substances Notification Regulations (Chemicals and Polymers), SOR/2005-247. Accessed December 20, 2021. <https://laws-lois.justice.gc.ca/eng/Regulations/SOR-2005-247/FullText.html>
  13. Conti JA, Killpack K, Gerritzen G, et al. Health and safety practices in the nanomaterials workplace: results from an international survey. *Environ Sci Technol*. 2008;42(9):3155–62. doi: 10.1021/es702158q
  14. Schulte P, Geraci C, Zumwalde R, Hoover M, Kuempel E. Occupational risk management of engineered nanoparticles. *J Occup Environ Hyg*. 2008;5(4):239–249. doi: 10.1080/15459620801907840
  15. Golanski L, Guillot A, Tardif F. Safe Production and Use of Nanomaterials. Are Conventional Protective Devices such as Fibrous Filter Media, Cartridge for Respirators, Protective Clothing and Gloves also Efficient for Nanoaerosols? NanoSafe: European Strategy for Nanosafety. Dissemination Report DR-325/326-200801-1, Jan 2008. Accessed May 30, 2022. [https://nanopinion.archiv.zsi.at/sites/default/files/dr1\\_s.pdf](https://nanopinion.archiv.zsi.at/sites/default/files/dr1_s.pdf)
  16. Bollinger N. NIOSH Respirator Selection Logic. DHHS (NIOSH) Publication No. 2005-100. Cincinnati, OH; 2004. Accessed December 20, 2021. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2005-100/pdfs/2005-100.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB2005100>
  17. NIOSH Respiratory Protective Devices, 42 CFR Part 84, 2009. Accessed January 17, 2022. <https://www.cdc.gov/niosh/npptl/topics/respirators/pt84abs2.html>
  18. Distrimed Masques de filtration FFP2 et FFP3, 2007. Accessed January 17, 2022. [http://www.distrimed.com/acatalog/fp\\_gm\\_masques\\_ffp2\\_ffp3.html](http://www.distrimed.com/acatalog/fp_gm_masques_ffp2_ffp3.html)
  19. Kim SC, Harrington MS, Pui DYH. Experimental study of nanoparticles penetration through commercial filter media. *J Nanopart Res*. 2007;9(1):117–125. doi: 10.1007/s11051-006-9176-4
  20. Rengasamy S, Eimer BC. Nanoparticle penetration through filter media and leakage through face seal interface of N95 filtering facepiece respirators. *Ann Occup Hyg*. 2012;56(5):568–580. doi: 10.1093/annhyg/mer122
  21. Rengasamy S, King WP, Eimer BC, Shaffer RE. Filtration performance of NIOSH-approved N95 and P100 filtering facepiece respirators against 4 to 30 nanometer-size nanoparticles. *J Occup Environ Hyg*. 2008;5(9):556–564. doi: 10.1080/15459620802275387
  22. *NIOSH Approaches to Safe Nanotechnology: Managing the Health and Safety Concerns Associated with Engineered Nanomaterials*. DHHS (NIOSH) Publication No. 2009-125. Accessed January 12, 2022. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2009-125/pdfs/2009-125.pdf>
  23. Yun KM, Hogan Jr CJ, Matsubayashi Y, Kawabe M, Iskandar F, Okuyama K. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers. *Chem Eng Sci*. 2007;62(17):4751–4759. doi: 10.1016/j.ces.2007.06.007
  24. Jung SJ, Mehta JS, Tong L. Effects of environment pollution on the ocular surface. *Ocul Surf*. 2018;16(2):198–205. doi: 10.1016/j.jtos.2018.03.001
  25. Dolez PI, Bodila N, Lara J, Truchon G. Personal protective equipment against nanoparticles. *Int J Nanotechnol*. 2010;7(1):99–117. doi: 10.1504/IJNT.2010.029550
  26. NIOSH. *Workplace Design Solutions: Protecting Workers during the Handling of Nanomaterials*. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2018-121. Accessed January 12, 2022. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2018-121/default.html>
  27. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. *2016 TLVs and BEIs: Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices*. Cincinnati, OH: ACGIH; 2016. Accessed January 12, 2022. <https://www.acgih.org/forms/store/ProductFormPublic/2016-tlvs-and-beis>
  28. Tsang MP, Kikuchi-Uehara E, Sonnemann GW, Aymonier C, Hirao M. Evaluating nanotechnology opportunities and risks through integration of life-cycle and risk assessment. *Nat Nanotechnol*. 2017;12(8):734–739. doi: 10.1038/nnano.2017.132
  29. Pietroiusti A, Stockmann-Juvala H, Lucaroni F, Savolainen K. Nanomaterial exposure, toxicity, and impact on human health. *Wiley Interdiscip Rev Nanomed Nanobio-technol*. 2018;10(5):e1513. doi: 10.1002/wnan.1513
  30. Podgórski A, Bałazy A, Trzeciak TM. Modelling the deposition of fractal-like aggregates. *J Aerosol Sci*. 2004;35(Suppl 1):203–250. doi: 10.1016/j.jaerosci.2004.06.065
  31. Shvedova AA, Kisin ER, Mercer R, et al. Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol*. 2005;289(5):L698–L708. doi: 10.1152/ajplung.00084.2005
  32. Bello D, Wardle BL, Yamamoto N, et al. Exposure to nanoscale particles and fibers during machining of hybrid advanced composites containing carbon nanotubes. *J Nanoparticle Res*. 2009;11(1):231–249. doi: 10.1007/s11051-008-9499-4
  33. Vinches L, Testori N, Dolez P, Perron G, Wilkinson KJ, Hallé S. Experimental evaluation of the penetration of TiO<sub>2</sub> nanoparticles through protective clothing and gloves under conditions simulating occupational use. *Nanoscience Methods*. 2013;2(1):1–15. doi: 10.1080/21642311.2013.771840
  34. Bennat C, Müller-Goymann CC. Skin penetration and stabilization of formulations containing microfine titanium dioxide as physical UV filter. *Int J Cosmet Sci*. 2000;22(4):271–283. doi: 10.1046/j.1467-2494.2000.00009.x
  35. Via R, Ostiguy C, Bennie J, et al. *Canadian Standards Association (CSA) Z12885-12: Nanotechnologies – Exposure Control Program for Engineered Nanomaterials in Occupational Settings*. CSA; 2012.
  36. Rivero PJ, Urrutia A, Goicoechea J, Arregui FJ. Nanomaterials for functional textiles and fibers. *Nanoscale Res Lett*. 2015;10(1):501. doi: 10.1186/s11671-015-1195-6
  37. Zhu S, Gong L, Li Y, Xu H, Gu Z, Zhao Y. Safety assessment of nanomaterials to eyes: An important but neglected issue. *Adv Sci (Weinh)*. 2019;6(16):1802289. doi: 10.1002/advs.201802289
  38. Abulikemu M, Tabrizi BEA, Ghobadloo SM, Mofarah HM, Jabbour GE. Silver nanoparticle-decorated personal protective equipment for inhibiting human coronavirus infectivity. *ACS Appl Nano Mater*. 2022;5(1):309–317. doi: 10.1021/acsnm.1c03033
  39. Dolez PI, Bodila N, Lara J, Truchon G. Personal protective equipment against nanoparticles. *Int J Nanotechnol*. 2010;7(1):99–117. doi: 10.1504/IJNT.2010.029550
  40. EU-OSHA. *E-fact 72: Tools for the Management of Nanomaterials in the Workplace and Prevention Measures*. June 19, 2013. Accessed January 12, 2022. <https://osha.europa.eu/en/publications/e-fact-72-tools-management-nanomaterials-workplace-and-prevention-measures>

