

МОНИТОРИНГ И ОЧИСТКА УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ТОННЕЛЯХ МЕТРОПОЛИТЕНА

Вильчевский М.В., студент

Научный руководитель Малькевич Н.Г.

Белорусский национальный технический университет, Беларусь

В статье обоснована необходимость перехода к мониторингу и очистке от ультрадисперсных частиц (PM0.1) в тоннелях метрополитена. Предложена система очистки электрофильтрации с регенерацией, адаптированная к условиям эксплуатации в Республике Беларусь.

Ключевые слова: транспортные тоннели, метрополитен, качество воздуха, ультрадисперсные частицы, электрофильтрация, экологическая безопасность

Транспорт играет уникальную роль, потому что связывает все сферы материального производства в единую систему хозяйственной деятельности. Развитая транспортная сеть имеет несомненные и неоспоримые преимущества. Но функционирование транспортных тоннелей сопровождается отрицательным воздействием транспорта на окружающую среду и на людей. Неблагоприятные экологические факторы, обусловленные функционированием транспорта воздействуют не только на пассажиров, но и на людей, которые находятся вне транспортных средств.

Современные системы мониторинга качества воздуха в транспортных тоннелях (метрополитенах, автодорожных тоннелях) в Республике Беларусь ориентированы преимущественно на контроль мельчайших твердых частиц диаметром 2 мкм (PM2.5) и 10 мкм (PM10) и в соответствии с Санитарными нормами и правилами и техническими кодексами установившейся практики. Эти показатели регламентированы и доступны для измерения стандартными оптическими счетчиками частиц. Кроме того, существующие системы мониторинга имеют нижний порог детекции 0,3 – 0,5 мкм, что делает ультрадисперсную фракцию «невидимой» для операторов.

В замкнутом пространстве тоннелей процессы износа колесных пар, рельсов, тормозных колодок и контактного провода генерируют значительное количество металлосодержащих наночастиц (железо, медь, марганец, хром). В результате пассажиры и персонал метрополитенов подвергаются хроническому воздействию твердых наночастиц. Для Республики Беларусь, где Минский метрополитен ежедневно перевозит более 800 тысяч пассажиров, а также ведется строительство новых линий, проблема оценки и снижения воздействия ультрадисперсных частиц приобретает особую актуальность.

Данные, накопленные в результате отечественных и зарубежных эпидемиологических исследований, свидетельствуют о том, что наибольшую опасность для здоровья человека представляют ультрадисперсные частицы диаметром менее 0,1 мкм (100 нм). Согласно исследованиям, проведенным в Минском метрополитене, концентрация взвешенных частиц превышает в 3 – 5 раз фоновые концентрации на поверхности.

В связи с вышеизложенным необходимо осуществлять мероприятия, которые позволят снизить и ослабить негативные воздействия на человека. Для этого существуют системы вентиляции и фильтрации, которые используются в транспортных тоннелях и эффективны для частиц размером более 1 мкм. Это фильтры высокоэффективной очистки, которые задерживают до 99,95 % частиц размером 0,3 мкм, однако их эффективность в отношении частиц размером 10 – 50 нм (размер частиц износа рельсов) снижается до 60 – 80 % из-за эффекта диффузионного проскока.

Основным направлением охраны воздуха от загрязняющих веществ должна быть разработка малоотходных и безотходных технологий. Наиболее необходимым решением указанной проблемы является разработка эффективных систем очистки, улавливания твердых частиц.

В качестве мероприятия, способного кардинально снизить загрязнение воздуха в транспортных тоннелях, предложена двухступенчатая электрофильтрация с последующей сорбционной доочисткой. В отличие от электрофильтров, где частицы заряжаются и осаждаются на одной пластине, двухступенчатая схема разделяет процессы зарядки и осаждения. Первая ступень — ионизатор (корона) заряжает частицы, вторая — осадительная камера с чередующимися пластинами улавливает их под действием электростатического поля. Такая система позволяет эффективно (95 %) улавливать частицы в диапазоне 0,01 – 1 мкм при низком аэродинамическом сопротивлении (менее 50 Па), что особенно важно для систем вентиляции тоннелей.

После электрофильтрации в воздухе остаются газообразные загрязнители (формальдегид, полициклические ароматические углеводороды, сорбированные на поверхности наночастиц). Для их удаления предложена установка сорбционных патронов с активированным углем, модифицированным наночастицами оксидов металлов: титана и марганца. Такая модификация позволяет обеспечить не только адсорбцию, но и каталитическое разложение органических соединений при комнатной температуре.

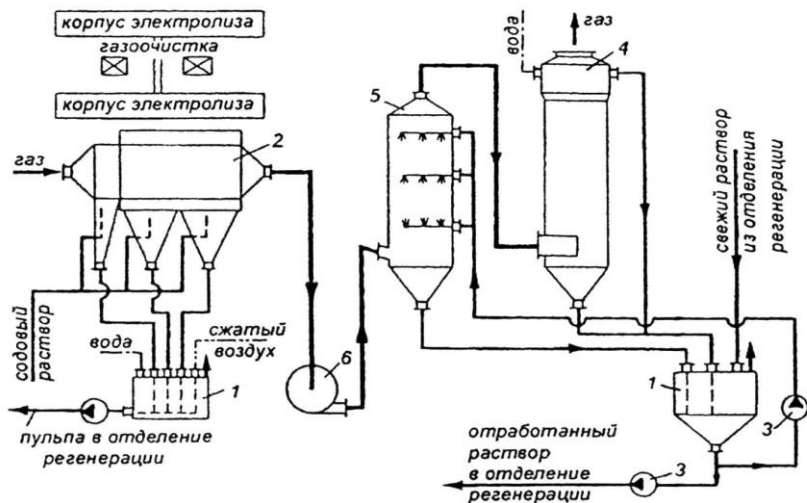


Рисунок 1 – Схема двухступенчатой системы электрофильтрации

Систему оичстки для Минского метрополитена необходимо устанавливать в следующих местах:

- вентиляционные шахты для очистки выбрасываемого наружу воздуха (снижение воздействия на жилые кварталы, особенно в центральной части Минска);
- тоннельные вентиляционные ниши для рециркуляционной очистки воздуха внутри тоннеля;
- системы кондиционирования платформ для защиты пассажиров в зонах ожидания.

Внедрение предлагаемой системы очистки в условиях Минского метрополитена позволит достичь следующих количественных показателей:

- снижение концентрации РМ0.1 в тоннельном воздухе на 85 – 95 % (с 20 – 50 мкг/м³ до 1 – 5 мкг/м³);
- снижение выбросов тяжелых металлов (Fe, Cu, Zn, Mn) в городскую среду на 90% за счет улавливания и переработки осадка;

– уменьшение техногенного теплового загрязнения за счет снижения необходимости в принудительной вентиляции (электрофильтры имеют низкое аэродинамическое сопротивление);

– снижение рисков респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний у пассажиров и персонала, что соответствует целям Государственной программы «Здоровье народа и демографическая безопасность»

Для эффективного управления системой очистки необходимо дополнить существующие сети сенсоров системы мониторинга счетчиками частиц (CPC) или диффузионными зарядными сенсорами (DCS), позволяющими измерять концентрацию частиц в диапазоне 0,01 – 1 мкм в реальном времени. В Республике Беларусь имеется опыт применения подобного оборудования в научных исследованиях (Институт природопользования НАН Беларуси), что создает базу для его промышленного внедрения.

Литература:

1. Санитарные нормы и правила «Требования к атмосферному воздуху населенных пунктов и местам отдыха населения». – Утверждены постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 30.12.2020 № 143. – [Государственное производственное проектно-строительное унитарное](#) (Дата обращения 20.03.2026).

2. Санитарные нормы и правила 1.2.3685–21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». – М.: Роспотребнадзор, 2021. – [Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 N 2 — Редакция от 24.12.2025 — Контур.Норматив](#) (Дата обращения 20.03.2026).

3. Шандала, М.Г., Новиков, С.М. Оценка риска влияния взвешенных частиц (PM10, PM2.5) на здоровье населения // Гигиена и санитария. – 2020. – Т. 99, № 4. – С. 340–345.

4. Лысенко, С.А., Коваленко, А.Д. Оценка качества воздуха на станциях Минского метрополитена // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2023. – № 2. – С. 45–52.

5. Белоусов, В.В., Семенов, А.А. Двухступенчатые электрофильтры для очистки воздуха в системах вентиляции // Вентиляция, отопление, кондиционирование. – 2022. – № 8. – С. 12–18.