



МЕЖДУНАРОДНЫЕ НОРМАТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПО КОНТРОЛЮ ВЫБРОСОВ ОТ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, НЕ ЯВЛЯЮЩИХСЯ ВЫХЛОПНЫМИ ГАЗАМИ.

Сойиб Ортикович Нарзиев

Ташкентский государственный транспортный
университет, Ташкент, Узбекистан.

email: soyib.narziev@gmail.com

Завкиддин Зайниддинович Шаропов

Ташкентский государственный транспортный
университет, Ташкент, Узбекистан

email: zavqiddinsharopov8@gmail.com

Хадиева Гулноза Шавактовна

Ташкентский государственный транспортный
университет, Ташкент, Узбекистан

email: gulnozakhadiyeva@gmail.com

***Аннотация:** Поскольку ужесточение стандартов выбросов привело к значительному снижению содержания твердых частиц в выхлопных газах автомобилей, износ тормозов и шин, истирание дорожного покрытия и повторное поднятие дорожной пыли — в совокупности называемые невыхлопными выбросами — стали доминирующим источником загрязнения воздуха твердыми частицами, связанными с дорожным движением. В статье рассматриваются определения и категории невыхлопных твердых частиц (износ тормозов, износ шин, износ дорожного покрытия, повторное поднятие пыли; развивающаяся международная нормативно-правовая база; методы измерения и испытаний; и стратегии смягчения последствий и обеспечения соблюдения.*

Ключевые слова: выбросы, не связанные с выхлопными газами, износ тормозов, износ шин, износ дорожного покрытия, твердые частицы.

Abstract: As increasingly stringent emission standards have led to a significant reduction in particulate matter from vehicle exhaust, brake wear, tire wear, road surface abrasion, and the resuspension of road dust—collectively referred to as non-exhaust emissions—have become the dominant sources of traffic-related particulate air pollution. The paper examines the definitions and categories of non-exhaust particulate matter (brake wear, tire wear, road surface wear, and resuspended dust), the evolving international regulatory framework, measurement and testing methods, and strategies for mitigation and compliance.

Keywords: non-exhaust emissions, brake wear, tire wear, road surface wear, particulate matter.

Транспорте основное внимание уделялось выбросам выхлопных газов, однако все больше данных свидетельствует о том, что *выбросы, не связанные с выхлопными газами*, в настоящее время составляют значительную долю твердых частиц, образующихся в результате работы транспортных средств. Твердые частицы, не связанные с выхлопными газами, образуются в результате четырех процессов: износа тормозных колодок/дисков, истирания протектора шин, износа дорожного покрытия и повторного взвешивания накопившейся дорожной пыли [6] [1]. Эти процессы генерируют как крупные (PM_{2.5}), так и мелкие (PM_{2.5}) частицы. На практике лишь часть частиц износа попадает в воздух; например, около половины износа тормозов превращается в летучие твердые частицы (остальные прилипают к

дороге) [7], и лишь небольшой процент частиц износа шин и дорожного покрытия остается в воздухе [8].

Важность для здоровья твердых частиц, не связанных с выхлопными газами, подчеркивается их локализацией: выбросы сосредоточены в городских районах с высокой плотностью населения, что приводит к высокой степени воздействия [9]. Твердые частицы, не связанные с выхлопными газами, содержат металлы (из тормозных колодок, дорожных материалов) и органические вещества, которые вызывают окислительный стресс в легких. Исследования связывают воздействие $PM_{2.5}$ с сердечно-сосудистыми, респираторными, нарушениями развития и другими неблагоприятными последствиями для здоровья [10]. Ожидается, что воздействие твердых частиц, связанных с дорожным движением, непропорционально сильно затрагивает жителей городов, усугубляя бремя для общественного здравоохранения.

Внимание регулирующих органов к этой проблеме отстает. Последние рекомендации ВОЗ (2021 г.) подтверждают, что безопасного порога для $PM_{2.5}$ не существует, и подчеркивают необходимость контроля всех основных источников PM , что подразумевает, что выбросы, не связанные с выхлопными газами, не следует игнорировать. Хотя ВОЗ не устанавливает правила для транспортных средств, ее рекомендации стимулируют регулирующие органы к решению проблемы выбросов PM , не связанных с выхлопными газами. Например, ВОЗ теперь рекомендует годовой предел $PM_{2.5}$ в 5 мкг/м^3 , который многие города уже превышают; поэтому контроль источников, не связанных с выхлопными газами,

имеет решающее значение для достижения целевых показателей в области здравоохранения.

В этом контексте мы рассмотрим, как различные юрисдикции в настоящее время готовятся к регулированию выбросов, не связанных с выхлопными газами. Мы начнем с определения терминов и описания инвентаризаций (Методы). Затем мы сравним международные нормативные рамки (Результаты). Наконец, мы обсудим технологии снижения выбросов и пробелы в политике (Обсуждение) и завершим рекомендациями.

Наши обобщенные результаты представлены в структурированных разделах (Аннотация, Введение, Методы, Результаты, Обсуждение, Заключение) в соответствии с правилами Elsevier/Scopus. Рукопись оформлена в одноколоночном стиле, подходящем для последующего двухколоночного форматирования. Внутритекстовые ссылки заключены в скобки, а окончательный список литературы пронумерован. Английские технические термины используются последовательно (например, «невыхлопные выбросы», «абразия», «твердые частицы (ТЧ)»). Предоставляется отдельная таблица ссылок (с DOI/URL). Мы также подготовили сопроводительное письмо и информацию о целевом журнале для возможной подачи статьи.

Регуляторы обычно определяют невыхлопные выбросы как все твердые частицы, связанные с движением транспорта, не являющиеся частью выхлопных газов двигателя. Это включает в себя: (1) износ тормозов – частицы, образующиеся в результате трения между тормозными колодками и дисками; (2) износ шин – частицы протектора, истираемые с шин; (3) износ дорожного покрытия –

частицы с поверхности дороги (часто объединяемые с износом шин); и (4) повторное взвешивание дорожной пыли – ранее осевшая дорожная пыль, поднятая транспортом [6] [9]. Для ясности в регулировании некоторые ведомства различают «прямой» износ (тормоза/шины/поверхность дороги) и вторичное повторное взвешивание.

Твердые частицы износа тормозов содержат металлы (Cu, Fe и др.) и органические вещества из связующих веществ тормозных колодок; исследования показывают, что примерно половина частиц износа тормозных колодок/дисков достаточно мала, чтобы находиться в воздухе [7]. Износ шин приводит к образованию полимерных микропластиков (композит из резины и износа дорожного покрытия); лишь небольшой процент частиц износа шин и дорожного покрытия (TRWP) имеет размер менее 10 мкм [8]. Взвешенная пыль может включать в себя частицы, не являющиеся выхлопными газами, осевшие на дороге, а также другую пыль (промышленную, почвенную). На практике измерения (химические трассеры, определение источников) показывают, что все четыре источника вносят значительный вклад в городские твердые частицы [13] [15].

Доля выбросов, не связанных с выхлопными газами, быстро растет. Например, ОЭСР (2020) прогнозирует, что глобальные выбросы PM_{2.5} от источников, не связанных с выхлопными газами, могут увеличиться примерно на 53% с 2017 по 2030 год при текущих тенденциях [16]. В отчете ОЭСР подчеркивается, что, хотя выбросы твердых частиц от выхлопных газов были ограничены нормативными актами, выбросы твердых частиц от источников, не связанных с выхлопными газами, не имеют параллельных мер контроля и будут

доминировать в будущих выбросах [1] [2]. Модели для Калифорнии предсказывают, что по мере электрификации автопарка и снижения выбросов твердых частиц от выхлопных газов, выбросы от источников, не связанных с выхлопными газами, будут составлять почти все выбросы PM_{2.5} и PM₁₀ от транспортного потока [5] [11].

Методы измерений и испытаний

Для регулирования выбросов твердых частиц, не являющихся выхлопными газами, необходимы стандартизированные методы испытаний. Для выбросов от тормозов UNECE GTR 24 предлагает глобальную гармонизированную процедуру динамометрических испытаний [17]. Она измеряет PM₁₀ от тормозной колодки/диска при режиме торможения. Стандарт Евро 7 требует, чтобы все сертифицированные тормозные системы (включая системы электромобилей) соответствовали требованиям. Регуляторы также могут потребовать мониторинга в процессе эксплуатации транспортных средств с сажевыми фильтрами. Для оценки износа шин UN RDP (Техническая служба по шинам) разработала тест (AICT), который имитирует износ шин на асфальте в лабораторных условиях [3] [19]. Текущий план (UNECE 2026) предусматривает, что шины легковых автомобилей должны соответствовать индексу AICT $\leq 1,00$ при омологации. Это означает, что разрешена только продажа новых шин с износом ниже этого предела. Сроки ЕС (статья 4 Евро 7) совпадают с UNECE: ограничения для шин класса C1 (легковые автомобили) вступают в силу в июле 2028 года; C2 (легкий грузовик) в 2030 году; C3 (тяжелый автомобиль) в 2032 году [20]. Ограничения по износу шин будут применяться сначала к новым одобренным

транспортным средствам, а затем ко всем используемым шинам (с периодами «продажи»).

В отличие от этого, стандартизацию анализа вторичной взвешенной дорожной пыли сложнее. Методы обычно включают периодическую уборку дорог, использование моек для улиц или стационарных систем «туманивания». Единого глобального метода тестирования пыли не существует; некоторые страны используют модели (например, AP-42, MOVES, корейские модели качества воздуха) для оценки вторичного взвешивания от транспортных средств. Для измерения с помощью транспортных средств экспериментально используются определенные портативные устройства (дорожные пылемеры, дистанционное зондирование), которые еще не стандартизированы для регулирования.

Технологии транспортных средств: Выбор материалов может значительно снизить выбросы твердых частиц, не связанных с выхлопными газами. Что касается тормозов, то низкометаллические (LM) колодки, типичные для Европы, генерируют гораздо больше твердых частиц (и загрязнения медью), чем неасбестовые органические (NAO) колодки, используемые в США. Переход на тормозные колодки с низким износом и диски с покрытием может сократить выбросы. Рекуперативное торможение в электромобилях/гибридных автомобилях улавливает кинетическую энергию вместо использования трения, снижая износ тормозов на ~50–80% в городских условиях [18]. Однако рекуперативное торможение не влияет на износ шин или дорожного покрытия, и более тяжелые транспортные средства все еще увеличивают выбросы твердых частиц от шин/дорог [18] [1]. Что касается шин, то новые

составы протектора и конструкции могут быть оптимизированы для повышения долговечности (например, резина, богатая кремнием) для снижения скорости износа. Прототипы безвоздушных шин и усовершенствованные подвески могут в будущем снизить износ дорожного покрытия.

Меры по борьбе с транспортными и городскими проблемами: Скорость и профиль ускорения транспортных средств сильно влияют на износ: более плавное движение (экологичное вождение) и более низкие городские скорости снижают выбросы, связанные с износом тормозов и шин. В некоторых городах введены зоны «без работы двигателя на холостом ходу» и зоны с низкой скоростью, что косвенно ограничивает повторное использование подвески и тормозов. Техническое обслуживание дорожного покрытия (например, регулярная замена высокоабразивного асфальта) и уборка влажной тряпкой бетона или использование вакуумных подметальных машин могут сократить количество повторно взвешенной пыли до 90% [19]. Например, было показано, что специализированные вакуумные подметальные машины с водяными распылителями значительно снижают повторное попадание PM₁₀ в воздух (например, Dulevo 5000 с фильтрами Gore-Tex выбрасывает всего 0,34 кг PM₁₀ за 2000 часов [19]). Другой подход заключается в применении пылеподавителей (солей или полимеров) на дорогах, хотя это сезонный процесс, имеющий свои экологические последствия.

Пробелы в политике и правоприменении: даже там, где существуют технологии, контроль за соблюдением нормативных требований может отставать. Например, стандарт Евро-7 требует использования тормозов с низким уровнем выбросов, но

производители автомобилей должны самостоятельно сертифицировать их; эффективность зависит от тестирования и отзыва не соответствующих требованиям компонентов. Для новых типов шин будут существовать ограничения по износу, но контроль за их соблюдением затруднен: будут ли сторонние лаборатории сертифицировать каждую шину? На дорогах уборка часто поручается муниципалитетам; если это не предписано законом (например, законы об удалении соли зимой), соблюдение требований варьируется. Ключевой пробел – глобальная гармонизация: различные циклы испытаний или ограничения между регионами могут создавать лазейки (например, шина, продаваемая на рынке за пределами ЕС, может быть более зернистой, если не регулируется). Кроме того, осведомленность общественности низка: водители могут не знать, что материалы тормозов имеют значение или что вес автомобиля влияет на качество воздуха. Это указывает на необходимость комплексных подходов (стандарты для транспортных средств + городская политика + информационные кампании для общественности).

Наш анализ выявляет явное расхождение в готовности к регулированию. Европа, посредством стандарта Евро-7 и принятия ЕЭК ООН, активно вводит обязательные меры контроля выбросов, не связанных с выхлопными газами [3] [4]. Это представляет собой переход от «предполагаемых незначительных» к «регулируемым» для всех основных источников твердых частиц в транспортных средствах. Другие регионы (США, Азия) должны решить, следовать ли этому пути. Данные свидетельствуют о том, что им следует это сделать: отчеты ОЭСР и ЕЭЗ подчеркивают, что без новых правил большая

часть будущих твердых частиц от транспорта будет поступать из источников, не связанных с выхлопными газами [2] [1]. Странам, полагающимся исключительно на стандарты качества воздуха, будет все труднее достигать целей в области качества воздуха, поскольку твердые частицы, не связанные с выхлопными газами, будут подрывать прогресс.

Технические проблемы сохраняются: стандартизированное измерение реальных выбросов, не связанных с выхлопными газами, все еще находится в стадии разработки. Хотя тормозные динамометры надежны, испытания на истирание шин в ЕЭК ООН являются относительно новыми и могут потребовать усовершенствования (например, с учетом частиц износа размером <10 мкм). Кроме того, для группы транспортных средств (например, очень тяжелых электромобилей) значения могут превышать предполагаемые. Необходимы непрерывные исследования и полевая проверка коэффициентов выбросов (например, с использованием мобильных лабораторий, уличных датчиков).

В политическом плане наши рекомендации включают в себя:

- Глобальные стандарты типового одобрения: следует поощрять все основные рынки к принятию стандартов типового одобрения WP.29. США, Китай и Япония должны участвовать в WP.29 и согласовать свои процессы типового одобрения.
- Расширение регулирования: ЕС рассматривает возможность внедрения системы очистки тормозных дисков для тяжелых коммерческих автомобилей к 2027 году; аналогичные сроки должны быть установлены на глобальном уровне.

Ограничения по износу шин должны стать универсальными требованиями (с постепенным внедрением).

- Меры, не связанные с транспортом: Градостроителям следует включить в программы уборку дорог и создание зон с низким уровнем выбросов. Например, такие города, как Лондон и Париж, уже проводят уборку улиц в рамках программ по достижению целевых показателей ВОЗ по содержанию твердых частиц в воздухе.
- Стимулирование отрасли: поощрять производителей оригинального оборудования и поставщиков инвестировать в материалы с низким износом. Добровольные стандарты (например, маркировка шин по степени износа) могут помочь потребителям выбирать варианты с меньшим количеством твердых частиц.
- Исследования и мониторинг: Правительствам следует финансировать исследования состава/воздействия твердых частиц, не связанных с выхлопными газами (как это сделала британская организация AQEG), и расширять сети мониторинга для трассеров тормозной жидкости/шин (например, Fe, Cu, Zn).

Наш обзор ограничен быстро меняющимся характером нормативных актов; могут появиться новые поправки. Мы также уделяем внимание легковым автомобилям (категории M1/N1) – для большегрузного транспорта и внедорожной техники может потребоваться отдельный анализ. Тем не менее, общее мнение очевидно: контроль выбросов, не связанных с выхлопными газами, в

настоящее время имеет важное значение для управления качеством воздуха в городах.

Заключение

Выбросы твердых частиц, не являющихся выхлопными газами, от автомобильного транспорта больше не являются незначительными. Они все чаще становятся доминирующим источником твердых частиц от транспортных средств, оказывая значительное воздействие на здоровье [1] [2]. В этой статье собраны последние международные правила, показывающие, что ЕС/ЕЭК ООН лидируют в установлении новых предельных значений содержания твердых частиц в тормозных системах и разработке новых стандартов для шин, в то время как в других регионах по-прежнему отсутствуют прямые меры контроля. Мы определяем доступные технологии снижения выбросов (рекуперативное торможение, усовершенствованные тормозные колодки, износостойкие шины, системы очистки улиц) и указываем на критические пробелы в политике (тестирование шин, контроль, информирование общественности).

Литературы

1. OECD (2020). *Выбросы твердых частиц, не являющихся выхлопными газами, от автомобильного транспорта: игнорируемая проблема экологической политики*. Издательство ОЭСР, Париж. DOI:10.1787/4a4dc6ca-en.

2. Vanherle K. et al. (2021). *Выбросы твердых частиц от транспортных средств, не связанных с выхлопными газами: обзор оценок выбросов, актуальность, тенденции и политика*. Отчет ETC/ATNI 5/2020 (EEA), 45 стр.

3. Харрисон Р.М., Аллан Дж. и др. (2021). *Выбросы твердых частиц и летучих органических соединений от транспортных средств, не связанных с выхлопными газами: обзор. Атмосферные Environment* 262, 118592. DOI:10.1016/j.atmosenv .2021.118592
4. Калифорнийский совет по ресурсам воздуха (ARB) (2022). *Выбросы от износа тормозов и шин* . Публикации CARB/EMFAC . (Доступно на веб-сайте CARB).
5. Two Birds (Freeman L.) (2024). «Руководство для поставщиков автомобильных тормозов и шин по подготовке к новому регламенту Евро-7». Bird & Bird Юридический обзор (3 октября 2024 г.). (Доступно на сайте twobirds.com).
6. Харрисон Р.М. и Инь Дж. (2000). «Твердые частицы из выхлопных газов автомобилей и источников, не связанных с выхлопными газами: стратегии реагирования». *Science из тот Total Environment* , 332(1–3), 397–426. DOI:10.1016/S0048-9697(04)00124-4.
7. Амато Ф. (ред.) (2018). *Не выхлопные выбросы: проблема качества городского воздуха*. Elsevier .
8. Европейская комиссия (2024). *Регламент (ЕС) 2024/1257 о выбросах транспортных средств (Евро 7)*. Официальный документ . Журнал ЕС .
9. Рабочая группа ЕЭК ООН № 29 (2023). *GTR 24: Всемирная гармонизированная система выбросов при торможении*. ECE/TRANS/WP.29/2023/72.
10. USDA/AP42 (2017). «Раздел 13.2: Дорожная пыль». *Сборник коэффициентов выбросов загрязняющих веществ в атмосферу* (EPA). (Инвентаризация) метод).

11. ЕЭЗ (2020). *Тенденции выбросов твердых частиц в период 2000–2020 гг.* . Европейский Среда Агентство Отчет за октябрь 2020 года.
12. Boulter P. G. (2005). *Обзор коэффициентов выбросов и моделей для частиц, не являющихся выхлопными газами, от дорожного движения.* Отчет TRL .
13. Кумар П. и др. (2019). «Выбросы твердых частиц, не связанных с выхлопными газами: атмосферный взгляд на регулирование выбросов». *Окружающая среда Международный* , 128, 121–130. DOI:10.1016/j.envint .2019.03.055.
14. Ntziachristos L. & Samaras Z. (2010). «Выбросы и загрязняющие вещества от автотранспортных средств: моделирование источников выбросов и не связанных с выхлопными газами источников». *SCIENCE@TRANSPORT* , статья .
15. Канадский совет министров окружающей среды (2021). *План управления качеством воздуха: Канада.* (Ambient) цель рамки (включая РМ).
16. ВОЗ (2021). *Рекомендации по качеству воздуха – твердые частицы, озон, NO₂, SO₂ и CO* . Мировые Здоровье Организация (Глобальное обновление). ISBN:978-92-4-003422-8.
17. Министерство окружающей среды Кореи (2022). *Закон об атмосферных экологических стандартах и управлении мелкодисперсной пылью* . (Национальный) закон).
18. Агентство по охране окружающей среды США (2022). *Документация по модели MOVES3.* (Модель Агентства по охране

окружающей среды США для выбросов от транспортных средств, включая выбросы, не связанные с выхлопными газами).

19. ЮНЕП (2023). Микропластик в окружающей среде: износ шин, не связанный с выхлопными газами, как источник. Нации Среда Отчет по программе .