УДК 504.064

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ В ПРОДУКТАХ ИЗНАШИВАНИЯ ТОРМОЗНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Зуботыгин Ю.Ю., Вольнов А.С.

ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», Оренбург, e-mail: Zubotygin.yura@mail.ru

Показано, что одним из основных источников выбросов дисперсных частиц (менее 10 мкм), которые оказывают негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека являются продукты изнашивания тормозных систем автомобилей. Анализ постоянных и переменных факторов, влияющих на изнашивание тормозной системы, позволил установить, что химический состав, масса и концентрации дисперсных частиц в процессе изнашивания существенно зависит от типа и производителя тормозных колодок и накладок, а также характера вождения водителем автотранспортного средства. Рассмотрены существующие методы (методики) измерения концентраций (массы) дисперсных частиц и нормы их допустимых выбросов в приземном слое атмосферы. С использованием метода стрелочных диаграмм проведено обоснование и выбор методики количественного химического анализа при оценке концентраций дисперсных частиц с учётом их гранулометрического состава в продуктах изнашивания тормозных механизмов.

Ключевые слова: приземный слой атмосферы, выбросы, тормозные механизмы, изнашивание, дисперсионные частицы, экологические показатели

THE SUBSTANTIATION OF THE METHODS OF ESTIMATION OF DISPERSE PARTICLES IN THE PRODUCTS OF BRAKE MECHANISMS

Zubotygin Y.Y., Volnov A.S.

Orenburg State University, Orenburg, e-mail: Zubotygin.yura@mail.ru

It is shown that one of the main sources of emissions of dispersed particles (less than 10 microns), which have a negative impact on the environment and human health, are wear products of brake systems of cars. Analysis of the permanent and variable factors affecting the wear of the braking system made it possible to establish that the chemical composition, mass and concentration of dispersed particles in the process of wear substantially depends on the type and manufacturer of the brake pads and linings, as well as the driver's driving behavior. Existing methods (methods) for measuring the concentrations (masses) of dispersed particles and the norms of their permissible emissions in the surface layer of the atmosphere are considered. Using the arrow diagram method, a substantiation and a choice of the quantitative chemical analysis technique for estimating the concentrations of dispersed particles, taking into account their particle size distribution in the wear products of the brake mechanisms, were carried out.

Keywords: surface layer of the atmosphere, emissions, brake mechanisms, wear, dispersion particles, environmental indicators

В настоящее время автомобильный транспорт является одной из самых значимых причин загрязнения окружающей среды. По современным представлениям наибольший процент вклада (80%) в образование дисперсных частиц (ДЧ) в атмосферном воздухе Москвы вносит автотранспортный комплекс (рис. 1) [1].

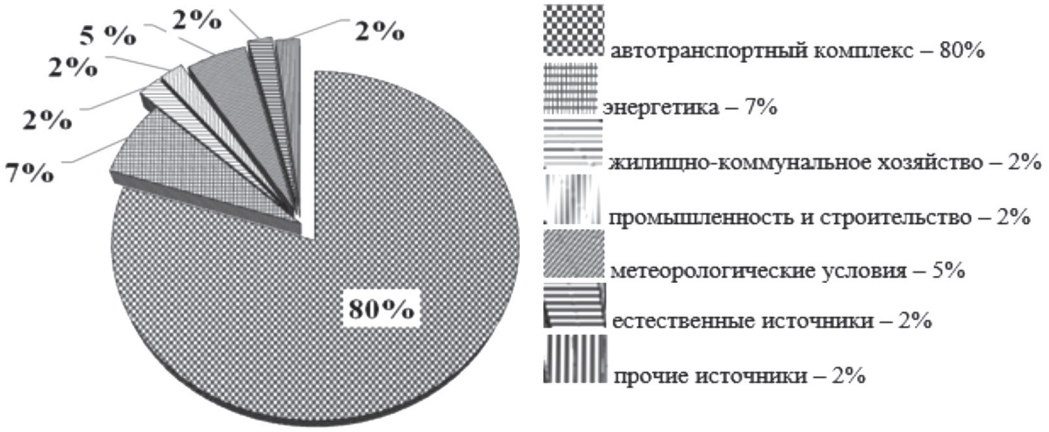

Рис. 1. Вклад разных источников в образование ДЧ в атмосферном воздухе города Москвы [1]

Вблизи автомобильных дорог уровень загрязнения атмосферного воздуха в 1,3 – 1,5 раза выше, чем на жилых территориях, защищенных от автотранспортных потоков застройкой. ДЧ образуются в результате взаимодействия между покрышками автотранспортных средств (АТС) и дорожного покрытия, а также в момент применения тормозов для снижения скорости [2, 3]. В обоих случаях основным механизмом образования ДЧ служат срезающие усилия, возникающие во время относительного перемещения поверхностей. К вопросу о нормировании выбросов ДЧ обращались авторы Рапопорт О.Л, Копылов И.Д., Рудной Г.Н [4]. ДЧ – твердые или жидкие частицы дисперсной фазы, содержащиеся в газообразной дисперсионной среде. ДЧ, обнаруживаемые в атмосфере, имеют различное происхождение, а также разнообразный химический и морфологический состав, обладают разными физическими характеристиками (табл. 1) [1].

Таблица 1

Обобщённая классификация ДЧ

Признак	Условное название	Разновидности и примеры
По происхождению		
Естественного происхождения	Природные	Минеральные (неорганические): песчаные бури, выветривание горных пород, вулканическая деятельность и т.д.
Антропогенного происхождения	Техногенные	ДЧ, образующиеся при сжигании разных видов топлива (т.е. от топливно-энергетического и транспортного комплексов).
Первичные	Первичные PM	Частицы, непосредственно поступающие в воздух, как от природных, так и от техногенных источников
Вторичные	Вторичные PM	Частицы, образующиеся в атмосфере в результате химических преобразований газообразных компонентов: SO_2, NO_x, NH_3, неметановых летучих органических соединений (ЛОС).
По размеру		
Мелкодисперсные (r< 0,25 мкм)	Тонкодисперсные, субмикроскопические аэрозоли	Дымовые частицы, частицы сажи (дымка, смог)
Среднедисперсные (0,25 мкм<r<10 мкм)	Микроскопические аэрозоли	Дымовые частицы, частицы сажи,
Грубодисперсные (> 10 мкм)	Гигантские аэрозоли	Пылевые бури
По форме		
Изометрические	Шаровидные	Приблизительно одинаковые размеры в трех направлениях: частицы сажи, кремнезема
Пластинчатые	Чешуйчатые	Размер в одном из направлений гораздо меньше, чем в других:
Волокнистые	Цепочечные	Вытянутые (протяженные) в одном направлении: асбестовая, стеклянная, металлическая и растительная пыль
По способу генерации		
Дисперсионные	–	Образуются в результате механического диспергирования твердых веществ и последующего рассеивания в воздухе ДЧ.
Конденсационные	–	Образуются при горении или возгонке веществ, т.е. при переходе из газообразного в твердое состояние, а также в результате фотохимических реакций в атмосфере с участием SO_2, NO_x, NH_3.

Одним из основных источников выбросов ДЧ (менее 10 мкм), которые оказывают негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека, являются продукты изнашивания тормозных систем АТС. Фрикционный материал тормозной накладки является важнейшим составным элементом механической части тормоза от которого зависит эффективность тормозной системы в целом, химический состав вредных веществ (ВВ) в продуктах изнашивания тормозных механизмов [5]. Ориентировочный состав ВВ в продуктах изнашивания тормозных механизмов выглядит следующим образом: Cu ~3,41 %; Ba~5,62 %; Mg~3,94 %; SO_4~2,06 %; элементарный углерод ~1,14 %; органический углерод~11,34 %; Si~5,23 % и прочие вещества ~ 39,48 %.

Проведённый нами анализ постоянных и переменных факторов (рис. 2) [6], влияющих на изнашивание тормозной системы, а, следовательно, и на выброс ДЧ в окружающую среду позволил установить, что химический состав, материала изнашивания тормозов зависит от производителя, типа и характера вождения [6].

По данным Агентства по охране окружающей среды США (USEPA, 1995 г.) и результатам работы Berdowski и др. (1997 г.), установлено, что около 98 % (по массе) ДЧ от изнашивания тормозов являются ДЧ10, в то время как около 40 % ДЧ10 – это ДЧ2,5, 10 % –ДЧ1, а 8 % – это ДЧ 0,1 [7]. Поэтому при нормальных условиях вождения большая часть взвешенных частиц изнашивания тормозов может рассматриваться в качестве ДЧ10, а значительная часть – в качестве ДЧ2,5. Результаты оценки, проведенной Sanders и др. (2003 г.) в отношении трех различных типов тормозных фрикционных накладок, позволили установить, что единый взвешенный усредненный диаметр размера во время вождения в городской черте составляет около 5–6 мкм. При условиях жесткого торможения, средний диаметр массы приближается к 10 мкм.

Рис. 2. Основные факторы, влияющие на выброс ДЧ в процессе изнашивания тормозной системы

Таким образом, учитывая опасность образования и поступления в приземный слой атмосферы ДЧ в продуктах изнашивания тормозных колодок, их оценка с учётом гранулометрического состава представляет собой сложную и актуальную задачу.

Цель работы: анализ существующих методов (методик) измерения концентраций (массы) ДЧ и норм их допустимых выбросов.

В 2010 году постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации были утверждены гигиенические нормативы для концентраций в атмосферном воздухе ДЧ 10 и ДЧ 2,5 (ГН 2.1.6.2604–10 «Дополнение № 8 к ГН 2.1.6.1338–03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе»). В табл. 2 представлены значения, утвержденных ПДК в атмосферном воздухе для ДЧ 10 и ДЧ 2,5 для России и США, а также критерии качества воздуха ВОЗ и нормативы стран Европейского Союза для данных ВВ.

Из табл. 2 видно, что нормативы, утвержденные в Российской Федерации, существенно мягче, чем рекомендованные ВОЗ критерии качества атмосферного воздуха. Что в свою очередь допускает возможность негативного воздействия ДЧ на здоровье людей (табл. 3). Так, например, в ходе исследований [1] выявлена положительная корреляционная связь между уровнем ДЧ 2,5 и количеством микробных тел (возбудители заболеваний верхних дыхательных путей, гнойно-септических инфекций стафилококки, стрептококки, синегнойная палочка, кишечная палочка, грибы) в пробах атмосферного воздуха вдоль автомобильной дороги.

Таким образом, именно контроль концентраций ДЧ10 и ДЧ2,5 является наиболее предпочтительным при оценке экологических показателей тормозных механизмов. Анализ существующих расчетных методик по инвентаризации выбросов ВВ в атмосферу АТС (табл. 4) показал, что пробеговые выбросы ДЧ в зарубежных и отечественных методиках рассчитываются суммарно, без детализации их гранулометрического состава. Так, методика НИИАТ [7] рассматривает удельный выброс суммарных ДЧ в пересчете на углерод, что не позволяет оценить уровень экологической опасности для окружающей среды и здоровья населения городов.

Таблица 2

Предельно допустимые концентрации ДЧ 10 и ДЧ 2,5

Страна	ПДК среднесуточная, мг/м^3		ПДК среднегодовая, мг/м^3	
	ДЧ 10	ДЧ 2,5	ДЧ 10	ДЧ 2,5
РФ	0,060	0,035	0,040	0,025
ВОЗ	0,050	0,025	0,020	0,010
ЕС	0,050	-	0,040	-
США	0,150	0,035	-	0,015

Таблица 3

Влияние ДЧ на здоровье населения [1]

Влияние, связанное с краткосрочным воздействием	Влияние, связанное с долгосрочным воздействием
1. Воспалительные реакции в легких	1. Увеличение количества заболевания нижних дыхательных путей
2. Респираторные заболевания	2. Ослабление функции легких у детей
3. Неблагоприятное воздействие на кардиоваскулярную систему	3. Усиление хронических заболеваний легких
4. Увеличение количества используемых медикаментов	4. Ослабление легочной функции у взрослых
5. Увеличение количества госпитализаций	5. Уменьшение продолжительности жизни, что связано в основном с кардиолегочными заболеваниями и раком

В зависимости от размеров частиц, их формы, фазового состояния и концентрации в настоящее время используется целый ряд методов анализа дисперсного состава частиц [2]. Основные методы измерения ДЧ, основанные на предварительном их осаждении и без предварительного осаждения, представлены на рис. 3.

Таблица 4

Существующие методики расчёта выбросов ДЧ и их сравнительные характеристики

Название методики (год принятия)	Определяемые ДЧ		Выбросы ДЧ, т/год*
Методика расчёта частиц от изнашивания фрикционных элементов тормозных колодок (2009 г.) [8]	ДЧ от изнашивания фрикционных элементов тормозных колодок АТС		618
Руководство по инвентаризации выбросов Европейского союза (2013 г.) [7]	ДЧ от изнашивания покрышек и тормозов	TSP	2017
		ДЧ10	1529
		ДЧ2,5	821
Методика оценки ДЧ10 от разных источников (Германия) (2010 г.) [9]	ДЧ10 от продуктов истирания материалов в конструкции автомобиля		<0,0255 кг/км·сут. Выброс ДЧ10 от износа тормозных накладок АТС<1 мг/(км·авт.).
Примечание. Для легковых АТС, грузовых АТС с максимальной массой 3,5–7,5 т и 7,5–40 т, автобусов			

Рис. 3. Основные методы измерений концентраций ДЧ

Отбор проб, сепарация по размерным фракциям и определение концентраций частиц представляет собой весьма сложную техническую задачу, на решение которой влияет множество факторов – электризация частиц, седиментация, неустойчивость во времени фракционного состава. Для контроля концентрации ДЧ применяются технические средства, работа которых основана на различных методах. Проведённый нами анализ преимуществ и недостатков основных методов измерения ДЧ позволил выбрать наиболее предпочтительные для оценки ДЧ в продуктах изнашивания тормозных механизмов (табл. 5).

Таблица 5

Анализ экспериментальных методов оценки ДЧ

Методы (методика)	Принцип	Размер частиц, мкм	Преимущества	Недостатки
Методы микроскопирования (ГОСТ Р 56929–2016, ГОСТ 23402–78, ГОСТ ИСО 4407 – 2006)	Изучение дисперсного состава пыли основано на визуальном изучении отдельных частиц – их числа, формы и размеров.	0,0006–100	Отсутствие дополнительных затрат на материалы.	Требуют пробоподготовки и не позволяют проводить измерения в реальном времени.
Гравиметрический метод (РД 52.04.830–2015, ГОСТ Р ИСО 9096–2006, ГОСТ 17.2.4.05–83, ГОСТ Р ИСО 8573–8–2007)	Метод заключается в выделении частиц из пылегазового потока с последующим осаждением их на аналитическом фильтре и осушении.	10, не более	Преимуществом гравиметрического метода является возможность прямого определения массовой концентраций пыли и отсутствие влияния ее физико-химических свойств на результат измерения.	Недостатком метода является его трудоемкость и длительность анализа. Метод не может быть использован для непрерывных измерений с передачей данных on-line и требует ежедневной ручной замены фильтров.
Гравиметрический метод пьезобалансового взвешивания (ТЕОМ) (ГОСТ Р ИСО 14622–3–2007)	Метод заключается в периодическом отборе пробы ДЧ через импактор, который отделяет необходимые для исследования фракции, с последующим их зарядом на коронирующем электроде и дальнейшем осаждении на его поверхности. В качестве электрода используется пьезоэлемент. Изменение веса пьезоэлемента и как следствие частоты его колебаний пропорциональны массовой концентрации ДЧ.	10, не более	К преимуществам метода следует отнести простоту применения, возможность вести непрерывные измерения, возможность on-line передачи данных. Гораздо меньше используется расходного материала	Не высокая точность. Вносит систематическую погрешность, в связи с нагревом пробы, в результате чего проба претерпевает изменение состава. Результат массовой концентрации имеет систематическую погрешность и его нужно корректировать.
Фотометрический (абсорбционный) метод (ГОСТ Р ИСО 10473–2007, РД 52.04.831–2015)	Метод основан на измерении ослабления интенсивности светового потока, вызванного его поглощением частичками пыли.	10, не более	Высокая чувствительность. Экспрессность (быстрота) проведения анализа, возможность автоматизации и компьютеризации.	Недостатком метода является его низкая чувствительность при измерении малых концентраций ДЧ (менее 30 мг/м3), а также невозможностью контроля высоких концентраций (более 10–12 г/м3).
Нефело- метрический (счетный) метод (ГОСТ 29024–91)	Основан на изменении направления лазера при попадании его в частицу, движущуюся в потоке с известным объемным расходом. Изменение направления луча фиксируется фотодетектором.	10, не более	Отсутствие недостатков присущих гравиметрическому методу (ТЕОМ). Корректировка автоматическая. Возможен лабораторный анализ.	Высокая стоимость анализа

С использованием метода стрелочных диаграмм (рисунок 4) нами проведено сравнение и выбор методики, удовлетворяющей требованиям при оценке экологической безопасности тормозных механизмов. Для сравнения нами выбраны стандартизованные методики определения количественного содержания ДЧ, наиболее часто применяемые в лабораторной практике:

– методика измерений массовых концентраций взвешенных частиц PM10 и PM2,5 в атмосферном воздухе гравиметрическим методом (РД 52.04.830–2015);

– методика измерений массовой концентрации углеродсодержащего аэрозоля в пробах атмосферного воздуха. Методика измерений фотометрическим методом (РД 52.04.831–2015).

Рассматриваемые методики: 1 – РД 52.04.830–2015; 2 – РД 52.04.831–2015;

– направление обхода при анализе;

– направление желаемого изменения рассматриваемого показателя.

Полученные с помощью стрелочной диаграммы результаты позволили выявить преимущество методики измерений массовых концентраций ДЧ, основанной на гравиметрическом методе (РД 52.04.830–2015), перед методикой измерений фотометрическим методом (РД 52.04.831–2015). Мы считаем, что эта методика приоритетна для проведения экологической оценки ДЧ в продуктах изнашивания тормозных механизмов по количественному признаку, поскольку обладает наилучшими метрологическими характеристиками, в частности, имеет малый диапазон погрешности. Основным преимуществом данной методики является возможность детализации гранулометрического состава (ДЧ10 и ДЧ2,5) с использованием импактора – селективного устройства для отделения анализируемой фракции взвешенных частиц. Данный метод может применяться для анализа в любых лабораторных условиях, поскольку не требует специальных и сложных для приготовления растворов и материалов.

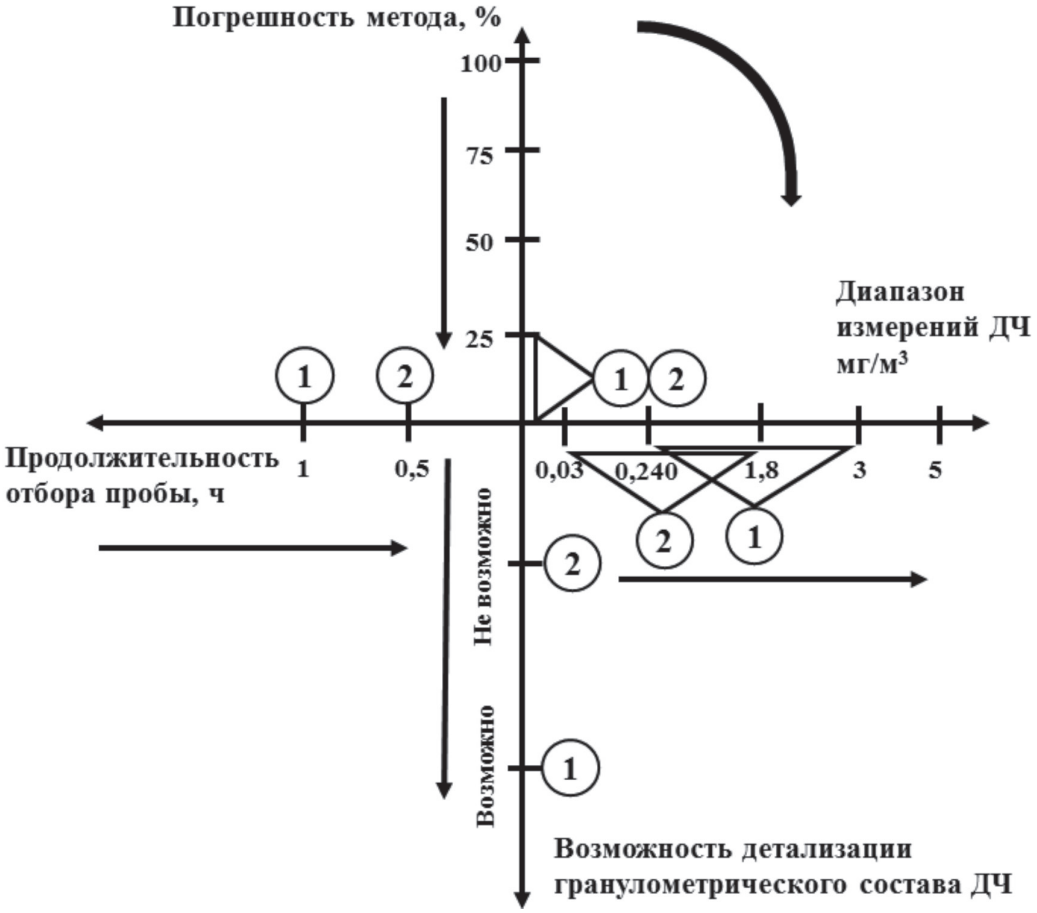

Рис. 4. Стрелочная диаграмма сравнения методов измерения в области мониторинга загрязнения ДЧ атмосферного воздуха

Выводы

1. Выбросы ДЧ10 от продуктов изнашивания тормозных механизмов являются значимым источником загрязнения приземного слоя атмосферы городов. Учитывая опасность образования и поступления в приземный слой атмосферы продуктов изнашивания тормозных колодок, оценка влияния ДЧ в процессе изнашивания тормозных механизмов на приземный слой атмосферы городов представляет собой сложную и актуальную задачу.

2 Необходима разработка комплексной методики оценки концентрации дисперсных частиц в продуктах изнашивания тормозных механизмов, которая позволит не только оценить их вклад в загрязнение приземного слоя атмосферы, но и комплексно оценить экологическую безопасность автотранспортных потоков. Причем концентрации ДЧ рассматриваются нами как индикаторы загрязнений при повышенном изнашивании тормозных механизмов.

3. Анализ гигиенических нормативов ДЧ10 и ДЧ2,5 в атмосферном воздухе показал, что требования, утвержденные в Российской Федерации, существенно мягче, чем рекомендованные ВОЗ критерии качества атмосферного воздуха. Что в свою очередь допускает возможность негативного воздействия ДЧ на здоровье людей. Поэтому именно контроль концентраций ДЧ10 и ДЧ2,5 является наиболее предпочтительным при оценке экологических показателей тормозных механизмов.

4 Существующие методики расчёта выбросов ДЧ в процессе изнашивания тормозных механизмов в зарубежных и отечественных методиках предполагают суммарный расчет, без детализации их гранулометрического состава. Применение стрелочной диаграммы, как инструмента управления качеством при выборе методик, позволило обосновать метод измерений массовых концентраций ДЧ (РД 52.04.830–2015), который может быть положен в основу комплексной методики оценки концентрации дисперсных частиц в продуктах изнашивания тормозных механизмов.

Работа выполнена под руководством профессора кафедры метрологии, стандартизации и сертификации – члена-корреспондента РАЕ, д.т.н., доцента Третьяк Л.Н.

Список литературы

1. Чижова, В.С. Повышение экологической безопасности автотранспортного комплекса путём снижения загрязнения воздуха дисперсными частицами размером менее десяти микрометров: дис. … канд. тех. наук / В.С. Чижова. – М., 2016. – 166 с.

2. Третьяк, Л.Н. О системном подходе к оценке влияния автотранспортных средств в процессе эксплуатации на экологию городов / Л.Н. Третьяк, А.С. Вольнов // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. – №1. – С. 161–166.

3. Вольнов, А.С. Математическая модель для оценки загрязнения автотранспортными потоками приземного слоя атмосферы на перекрёстках внутригородских автомобильных дорог/ А.С. Вольнов // Интеллект. Инновации. Инвестиции.– 2016.– №7. – С. 103–111.

4. Рапопорт, О.А. К вопросу о нормировании выбросов мелкодисперсных частиц размерами менее 10 мкм (ДЧ10) и менее 2,5 мкм (ДЧ2,5) / И.Д. Копылов, Г.Н. Рудой // Экологический вестник России. – 2012. – С. 1–6.

5. Вольнов, А.С. Допустимый уровень загрязнения приземного слоя атмосферы автомобильных дорог как показатель экологической безопасности автотранспортных потоков / А.С. Вольнов, Е.М. Герасимов, Л.Н. Третьяк // Интеграционные процессы в науке в современных условиях: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. (г. Казань, 8 ноября 2015 г.). В 2 ч. Ч.1 – Уфа: РИО МЦИИ ОМЕГА САЙНС, 2015. – С. 4–14.

6. Зуботыгин, Ю.Ю. Анализ негативного влияния вредных веществ в продуктах изнашивания тормозных механизмов на приземный слой атмосферы // Ю.Ю. Зуботыгин, К.В. Сырчин [Электронный ресурс] ./ Российская Академия Естествознания. – М.: scienceforum.ru, 2012–2017. – Режим доступа: http://www.scienceforum.ru/2017/2289/33503 – 24.1.2017.

7. Руководство ЕМЕП/ЕАОС по инвентаризации выбросов 2013. Общие руководящие указания по подготовке национальных инвентаризаций выбросов [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013 – 12.01.2018.

8. Методология активного воздействия на экологическую нагрузку городского автотранспорта: монография / В.А. Гудков, Ю.Я. Комаров, В.Н. Федотов / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – 143 с.

9. PM10–Emissionen an Außerortsstraßen mit Zusatzuntersuchung zum Vergleich der PM10–Konzentrationen aus Messungen an der A 1 Hamburg und Ausbreitungsrechnungen (Düring, I., Bösinger, R., Lohmeyer, A.). Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik Heft V 125, ISBN 3–86509–307–8, Bergisch-Gladbach, Juni 2005.