

УДК 504.064.38

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ В ВОЗДУХЕ ПРИМАГИСТРАЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ ДОРОГ МЕСТНОГО ЗНАЧЕНИЯ

Азаров В.Н.¹, Иванова Ю.П.², Добринская А.А.³, Иванова О.О.⁴,
Соловьева Т.В.⁵, Маринина О.Н.⁶, Зимницкая А.О.⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Волгоградский государственный технический университет
400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28; e-mail: ¹azarovpubl@mail.ru, ²yri26@mail.ru, ³sax.nastya@yandex.ru,
⁴dokuch26@mail.ru, ⁵tatianasolovyova2010@yandex.ru, ⁶day.meednight@gmail.com, ⁷ivanova200607@mail.ru

Аннотация. В данной статье представлено исследование факторов, влияющих на концентрацию и распространение мелкодисперсной пыли на примагистральных территориях дорог местного значения (частиц с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм - PM_{10} , и менее 2.5 мкм - $PM_{2.5}$). Рассмотрены десять ключевых факторов, влияющих на формирование, перенос и осаждение мелкодисперсной пыли, включая метеорологические условия (скорость и направление ветра, влажность, температура), характеристики дорожного покрытия, интенсивность транспортного потока, типы транспортных средств. Рассмотрены факторы, влияющие на концентрацию мелкодисперсной пыли на примагистральных территориях дорог местного значения.

Цель. Исследование влияния ряда факторов, таких как скорость транспортного потока, интенсивность движения, тип дорожного покрытия и метеорологические условия на концентрацию пыли PM_{10} и $PM_{2.5}$ в атмосферном воздухе примагистральных территорий дорог местного значения.

Методы. Для определения концентрации мелкодисперсной пыли $PM_{2.5}$, PM_{10} проводились экспериментальные исследования на примагистральных территориях дорог местного значения. С обработкой полученных параметров по программе STATISTIKA 10.

Результаты. Получены уравнения линейной регрессии для дорог местного значения. Выделены значимые факторы, влияющие на концентрацию мелкодисперсной пыли на примагистральных территориях.

Ключевые слова: линейный город, автомобильный транспорт, дороги местного значения, примагистральная территория, загрязняющие вещества, мелкодисперсная пыль

ВВЕДЕНИЕ

Мелкодисперсная пыль, образующаяся на дорогах местного значения, представляет собой значимую экологическую и социальную проблему, оказывающую влияние на здоровье населения, состояние окружающей среды и эксплуатационные характеристики дорожной инфраструктуры [1-3]. Основными источниками пылеобразования являются износ дорожного покрытия, движение транспортных средств, природные факторы, такие как ветер и осадки, а также факторы антропогенного воздействия, включающие в себя строительные работы и сельскохозяйственную деятельность. Особое внимание в исследованиях уделяется частицам PM_{10} и $PM_{2.5}$, которые способны проникать в дыхательные пути человека, вызывая негативные последствия для здоровья [4-6].

Дороги местного значения, часто характеризующиеся низким качеством покрытия и высокой интенсивностью пылеобразования, требуют систематического изучения факторов, влияющих на эмиссию мелкодисперсной пыли [7-9]. Несмотря на значительное количество работ, посвященных пылеобразованию на автомагистралях, исследования для дорог местного значения проводятся в недостаточном объеме. Это обусловлено их неоднородностью, разнообразием типов покрытий (грунтовые, гравийные, асфальтовые) и локальными особенностями эксплуатации [10].

Настоящая статья посвящена анализу ключевых факторов, определяющих уровень загрязнения мелкодисперсной пылью придорожных территорий дорог местного значения.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ; МАТЕРИАЛОВ, МЕТОДОВ

Исследования мелкодисперсной пыли, образующейся на дорогах, активно проводятся в различных странах, однако основное внимание уделяется дорогам городского и районного значения с более интенсивным движением транспортных потоков.

В работах [11, 12] подчеркивается, что частицы PM_{10} и $PM_{2.5}$, выделяющиеся в результате износа дорожного покрытия и шин, а также выхлопных газов, являются ключевыми загрязнителями

атмосферного воздуха. Эти частицы способны оседать в дыхательных путях, вызывая респираторные и сердечно-сосудистые заболевания [13-17].

Для дорог местного значения, часто имеющих грунтовое или гравийное покрытие, исследования ограничены. В публикациях [18, 19] отмечается, что пылеобразование на таких дорогах зависит от типа покрытия, скорости и массы транспортных средств, а также метеорологических условий (влажность, скорость ветра). Однако данные о составе мелкодисперсной пыли и ее количественных характеристиках в таких условиях недостаточны изучены и освещены в литературных источниках. В работе [20] описаны методы пылеподавления, включая применение химических реагентов и увлажнение, но их эффективность для дорог местного значения требует дополнительного изучения.

ЦЕЛЬ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью настоящего исследования является исследование влияния ряда факторов, таких как скорость транспортного потока, интенсивность движения, тип дорожного покрытия и метеорологические условия на концентрацию пыли PM_{10} и $PM_{2,5}$ в атмосферном воздухе прилегающих территорий дорог местного значения.

Исследование направлено на решение следующих задач:

1. Определить основные факторы, влияющие на концентрацию пыли в воздухе прилегающих территорий дорог местного значения.

2. Получить уравнения регрессии, отражающие зависимость концентраций пыли PM_{10} и $PM_{2,5}$ от основных влияющих факторов с определением коэффициентов корреляции.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

В ходе исследования были получены уравнения линейной регрессии, устанавливающие связь между – концентраций мелкодисперсной пыли ($PM_{2,5}$, mg/m^3 ; PM_{10} , mg/m^3) с десятью основными факторами, определяющими степень загрязнения атмосферного воздуха вблизи дорог местного значения.

Исходные данные собраны в ходе натурных исследований, в 8 районах линейного города Волгограда на прилегающих территориях, где было отобрано 95 точек для измерения концентрации мелкодисперсной пыли. Эти территории условно разделены по интенсивности движения на категории: магистрали городского значения, магистрали районного значения и магистрали местного значения, включающие дороги селитебных зон, внутриквартальные и внутридворовые проезды. Количество точек для замеров определено для обеспечения достоверной вероятности $\alpha=0,05$, что потребовало проведения измерений в 95 мониторинговых точках с трехкратным повторением контрольных замеров. Интервалы изменения параметров приведены в таблице 1.

К магистралям местного значения на обследуемой территории относятся улицы: Кузнецова, Репина, К. Либкнехта, Гагарина и др. Селитебная зона слева вдоль улиц преимущественно представлена частным сектором и 5-ти этажными жилыми домами. Справа преимущественно 5-ти этажные жилые дома и частная одноэтажная застройка, газозащитная зеленая зона (ГЗЗ) представлена 1-2 рядной посадкой деревьев. Дендрологический состав ГЗЗ в основном представлена: тополем обыкновенным, кленом раскидистым, акацией белой, вязом мелколистным, реже елью обыкновенной. Дорожное покрытие преимущественно выполнено асфальтом, в частном секторе преобладает грунтовое покрытие.

Рассматриваемые факторы характеризуют как особенности транспортной инфраструктуры и уровень интенсивности движения, так и метеорологические условия, влияющие на процесс формирования, рассеивания и осаждения пылевых частиц.

Интенсивность транспортного потока, измеренная как $J_1 = 200-800$ авт/час для легковых автомобилей и $J_2 = 10-90$ авт/час для грузовых, также играет важную роль. Максимальная концентрация пыли фиксировалась при $J_1 = 300-500$ авт/час на грунтовых и гравийных покрытиях.

Таблица 1. Таблица для нормирования значений факторов (дороги местного значения)

фактор	Диапазон изменений	Интервал варьирования Δx	Середина диапазона x_{cp}
L — длина участка, км;	0,15-0,55	0,2	0,35
J_1 — интенсивность легковых автомобилей, авт/час;	200-800	300	500
J_2 — интенсивность грузовых автомобилей, авт/час;	10-90	40	50
V_a — средняя скорость движения транспортного потока, км/час;	35-50	7,5	42,5
α — продольный уклон проезжей части, градусы;	2-6	2	4
φ — относительная влажность воздуха, %;	30-46	8	38
t — температура воздуха, $^{\circ}C$;	20-32	6	26
V_v — скорость ветра, м/с;	3-7	2	5
θ — угол ветра к дороге, в градусах;	4-90	43	47
Q — давление, мм рт.ст.;	740-750	5	745
$PM_{2,5}$ — концентрация пыли, mg/m^3 ;	10,6-16,8	3,1	13,7
PM_{10} — концентрация пыли, mg/m^3 ;	54,2-149,2	47,5	101,7
$P_{сум.}$ — общая пыль, mg/m^3 .	77,9-185,2	53,65	131,55

Для дорог местного значения объем выборки равен 31 измерению. Во всех уравнениях регрессии включены только значимые переменные. Расчеты показали, что для дорог местного значения имеет место линейная регрессия. Все коэффициенты полученных уравнений регрессии были проверены на значимость с помощью t -критерия Стьюдента при уровне значимости, равном 0,05, а так же для каждого уравнения вычислен множественный коэффициент корреляции, характеризующий тесноту связи между зависимой переменной и всеми остальными факторами.

Кроме того, проверялось общее качество каждого полученного уравнения регрессии. Оценка значимости уравнения множественной регрессии осуществлялась на основе F -критерия Фишера при уровне значимости, равном 0,05. По каждой выборке рассчитывалось фактическое значение F -критерия, которое сравнивалось с критическим значением F -распределения. Результаты проверки показаны в таблице 2 для всех типов дорог.

Таблица 2. Проверка адекватности уравнения регрессии на основе F -критерия Фишера

Значение дорог	Концентрация пыли	Объем выборки	Фактическое значение F -критерия	Критическое значение F -распределения
Местного	$PM_{2,5}$	31	$F(10,20) = 10,655$	$F_{кр} = 2,348$
	PM_{10}		$F(10,20) = 15,267$	
	$P_{сум.}$		$F(10,20) = 14,135$	

Из таблицы 2 следует, что во всех случаях вычисленное фактическое значение F -критерия Фишера превышает критическое значение F -распределения. Следовательно, все полученные уравнения регрессии значимы.

Полученные линейные уравнения регрессии и соответствующие им коэффициенты корреляции указаны в таблице 3.

Таблица 3. Линейные уравнения регрессии для дорог местного значения

Уравнения регрессии	Коэффициент корреляции R
$Y_1 = 0,072581 + 0,002051x_1 + 0,003723x_4 - 0,005215x_5 - 0,001312x_6 - 0,003026x_9$	0,86
$Y_2 = 0,30006 + 0,010868x_2 - 0,091235x_6 + 0,014554x_9$	0,94
$Y_3 = 0,222541 + 0,011268x_2 - 0,010358x_3 - 0,062316x_6$	0,94

ВЫВОДЫ

Таким образом, для дорог местного значения значимыми являются следующие факторы:

- для концентрации пыли PM_{2,5} — длина участка, средняя скорость движения транспортного потока, продольный уклон проезжей части, относительная влажность воздуха, угол ветра к дороге;
- для концентрации пыли PM₁₀ — интенсивность легковых автомобилей, относительная влажность воздуха, угол ветра к дороге;
- для концентрации общей пыли PM_{сум} — интенсивность легковых автомобилей, интенсивность грузовых автомобилей, относительная влажность воздуха.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для углубления понимания механизмов пылевого загрязнения рекомендуется расширить выборку измерений, включив дополнительные типы дорог и сезоны, а также провести анализ химического состава частиц PM_{2,5} и PM₁₀ для выявления их источников. Кроме того, дальнейшие исследования могут быть направлены на моделирование взаимодействия факторов в условиях сложной городской застройки и разработку интегрированных систем мониторинга в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Азаров, В.Н. Об исследовании аэродинамических характеристик асбестоцементной пыли в выбросах в атмосферу / В. Н. Азаров, О. В. Бурлаченко, Р. А. Бурханова, Н. А. Маринин // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2012. – Вып. 1(20). Электронный ресурс – ISSN 1994-0351. www.vestnik.vgasu.ru
2. Азаров, В.Н. Повышение экологической безопасности стройиндустрии совершенствованием систем обеспыливания с использованием комплексного дисперсионного анализа пылевых выбросов / В.Н. Азаров, С.А. Кошкарёв // Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – №43. – С. 161-174.
3. Азаров, В.Н. Экспериментальные исследования закономерностей распространения и оседания цементной пыли в воздухе рабочей зоны оператора линии упаковки цемента [Текст] / Азаров В.Н, Мензелинцева Н.В., Фомина Е.О. // Наука и образование: архитектура, градостроительство и строительство. Материалы международной конференции посвященной 60-летию образования Вуза. – Волгоград, 2012. – С. 83-87.
4. Азаров, В.Н. Problems of protection of urban ambient air pollution from industrial dust emissions [Электронный ресурс] / В.Н. Азаров, Н.М. Сергина, Т. Кондратенко // MATEC Web of Conferences. Vol. 106 : International Science Conference SPbWOSCE-2016 «SMART City» (St. Petersburg, Russia, November 15-17, 2016) / ed. by V. Murgul ; the Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Institute of Civil Engineering. – [Publisher: EDP Sciences], 2017. – URL: <https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2017/20/contents/contents.html>.
5. Устройство для определения дисперсного состава пыли [Текст]: пат. 135806 Рос. Федерация: МПК G01N 15/00 / Маринин Н.А. [и др.]. патентообладатель ФГБОУ ВПО "Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет" – № 2013121082/28; заявл. 07.05.2013; опубл. 20.12.2013, Бюл. № 35. – 4 с.

6. Медников, Е. П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей / Е. П. Медников. – М. : Наука, 1981. – 176 с.
7. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов, - 3-е изд., перераб. – Л. : Химия, Ленингр. отделение, 1987.
8. Фукс, Н. А. Механика аэрозолей / Н. А. Фукс. – М. : АН СССР, 1955. – 353 с.
9. Азаров, В.Н. Анализ закономерностей оседания пылевых частиц в рабочей зоне оператора карусельной машины отделения упаковки цемента [Текст] / Азаров В.Н., Карапузова Н.Ю., Стефаненко С.И.// Научные труды SWold, 2011: – Т.5., №3. – С.44-46.
10. Азаров, В.Н. Aerodynamic Characteristics of Dust in the Emissions Into the Atmosphere and Working Zone of Construction Enterprises / В.Н. Азаров, А.И. Evtushenko, В.П. Батманов, А.Б. Стреляева, В.В. Лупиногин // International Review of Civil Engineering. – 2016. – Vol. 7, No. 5. – С. 132-136.
11. Thorpe A., Harrison R.M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: A review. Sci. Total Environ. 2008;400:270–282.
12. Amato, F., et al. Urban air quality: The challenge of traffic non-exhaust emissions. J. Hazard. Mater. 2014;275:31–36.
13. WHO. Health effects of particulate matter. World Health Organization, 2013.
14. Стефаненко, И.В. Research of air flows dynamics at construction works in the condition of urban built-up areas [Электронный ресурс] / И.В. Стефаненко, В.Н. Азаров, К.А. Трохимчук, М.В. Трохимчук // Applied Mechanics and Materials. The 2nd International Conference Material, 2018. – Vol. 875. – P. 183-186. – doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.875.183.
15. Сидельникова, О.П. Использование недорогих датчиков частиц для мониторинга загрязнения атмосферного воздуха пылевыми частицами PM_{2.5} / О. П. Сидельникова, В. А. Багров, Ф.Г. Антонов[и др.]// Экономика строительства и природопользования. – 2023. – №4(89). – С.50-59.
16. Азаров, В.Н. О концентрации оксида углерода в воздушной среде придорожных территорий / В. Н. Азаров, Ю. П. Иванова, А. А. Добринская [и др.] // Экономика строительства и природопользования. – 2023. – № 4(89). – С. 5-14.
17. СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: издание официальное : утвержден Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 28.01.2021 : введен 20.03.2023. – <https://ds278-krasnoyarsk-r04.gosweb.gosu>
18. Edvardsson K., Magnusson R. Dust generation on gravel roads: A review. Transp. Res. Part D. 2011;16:347–357.
19. Kuhns H., et al. Testing re-entrained aerosol kinetic emissions from roads (TRAKER). Atmos. Environ. 2003;37:4787–4795.
20. Jones D., et al. Dust suppression on unpaved roads: A review of technologies. J. Transp. Eng. 2015;141:04015002.

INVESTIGATION OF THE CONCENTRATION OF FINE DUST IN THE AIR OF ROADSIDE AREAS OF LOCAL ROADS

¹Azarov V.N., ²Ivanova Y.P., ³Dobrinskaya A.A., ⁴Ivanova O.O., ⁵Solovyova T.V.,
⁶Marinina O.N., ⁷Zimnitskaya A.O.

^{1,2,3,4,5,6,7} Volgograd State Technical University, Volgograd

Annotation. This article presents a study of the factors affecting the concentration and distribution of fine dust in the vicinity of local roads (particles with an aerodynamic diameter of less than 10 µm - PM₁₀, and less than 2.5 µm - PM_{2.5}). Ten key factors affecting the formation, transport, and deposition of fine dust are considered, including meteorological conditions (wind speed and direction, humidity, and temperature), road surface characteristics, traffic flow intensity, and vehicle types. The article examines the factors affecting the concentration of fine dust in the vicinity of local roads.

Keywords: linear city, road transport, local roads, mainline territory, pollutants, fine dust