

Оценка эффективности очистки воздуха на улично-дорожной сети крупного города зелеными насаждениями и фотокаталитическими очистителями

Ю.В. Трофименко, д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой¹

В.С. Ворожнин, младший научный сотрудник²

В.Б. Давыдов, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник²

С.С. Зубова, канд. сель.-хоз. наук, ст. преподаватель³

¹ Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

² Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН

³ Уральский государственный лесотехнический университет (УГЛТУ)

e-mail: ywtrofimenko@mail.ru

Ключевые слова:

автомобильный транспорт,
улично-дорожная сеть,
воздух,
очистка,
зеленые насаждения,
фотокаталитические очистители.

Рассматриваются методы организации очистки воздуха на улично-дорожной сети города Екатеринбурга. Загрязнение воздуха автотранспортом и поток загрязняющих веществ в пассажирское помещение автомобиля оцениваются с использованием полученных закономерностей, дисперсионных моделей, характеристик транспортных потоков и данных о текущих погодных условиях. На основе баланса потоков установлена допустимая плотность автомобилей на территории города с учетом их выбросов и работы фотокаталитических очистителей в салонах автотранспортных средств и фотокаталитических покрытий на поверхностях улично-дорожной сети (акустических экранах, тротуарах, зданиях), а также за счет обработки загрязняющих веществ различными видами древесной растительности (защитных полос, парков и лесопарков). Определено, что удаление CO с помощью имеющейся городской растительности эквивалентно дополнительному присутствию на улицах города 0,2–0,4% автомобилей от общего числа эксплуатируемого транспорта без ухудшения качества воздуха. В работе оценивается необходимая площадь активной поверхности фотокаталитических очистителей в салоне легкового автомобиля, автобуса, а также ширина ограждающих поверхностей с нанесенными фотокаталитическими покрытиями в районе пешеходной зоны. Установлено, что совместное использование рассмотренных методов очистки способно приводить к ежегодному снижению средней концентрации по городу оксида углерода от 0,14 до 6%, а оксидов азота от 0,15 до 5,78%.

1. Введение

Рост численности автомобильного парка в городах приводит к увеличению негативного воздействия на окружающую среду, в частности к росту загрязнения атмосферного воздуха на улично-дорожной сети (УДС). Традиционно принимаемые организационные, инженерно-технические мероприятия для улучшения экологической ситуации в городах,

связанные с деятельностью автомобильного транспорта, во многом исчерпали свои возможности. Поэтому продолжается поиск дополнительных инструментов, направленных на нейтрализацию выбросов загрязняющих веществ непосредственно на УДС и в непосредственной близости от нее. Например, использование для очистки воздуха зеленых насаждений, а также различных видов фотокаталитических

Методы и средства обеспечения безопасности Methods and Means of Safety

очистителей в салонах автомобилей и фотокаталитических покрытий объектов обустройства городских дорог или улиц [1, 7–9, 13]. Рассмотрим основные положения методики оценки эффективности очистки воздуха на улично-дорожной сети крупного города зелеными насаждениями и фотокаталитическими очистителями, которая была апробирована на примере г. Екатеринбурга.

2. Объект исследования

Площадь территории города составляет около 490 км², 6% из которой занято улично-дорожной сетью, а 45,3% городской растительностью. Большое скопление объектов застройки в центре и отсутствие свободных территорий приводит к вытеснению городской растительности (11% от площади центра города). Уровень автомобилизации в городе составляет порядка 400 легковых автомобилей на тысячу жителей. Общая протяженность улично-дорожной

сети — 965 км. Территория города была разделена на три транспортные зоны (рис. 1): центр города, зона 1 и зона 2. В пределах каждой зоны выделялись типовые участки дорог в соответствии с общепринятой классификацией [2]: четыре — в центре и три в остальных зонах. Характеристики выделенных участков дорог представлены в табл. 1.

При составлении методики и проведении расчетов принята наиболее распространенная схема расположения (конструкция) зеленых насаждений, тротуаров, обеспечивающих поглощение загрязняющих веществ на УДС: вблизи проезжей части располагался ряд (один или несколько) деревьев (кустарников), а затем пешеходная зона.

3. Оценка загрязнения воздуха автомобильным транспортом на улично-дорожной сети

Рассматривались газообразные загрязняющие вещества, являющиеся основными компонентами

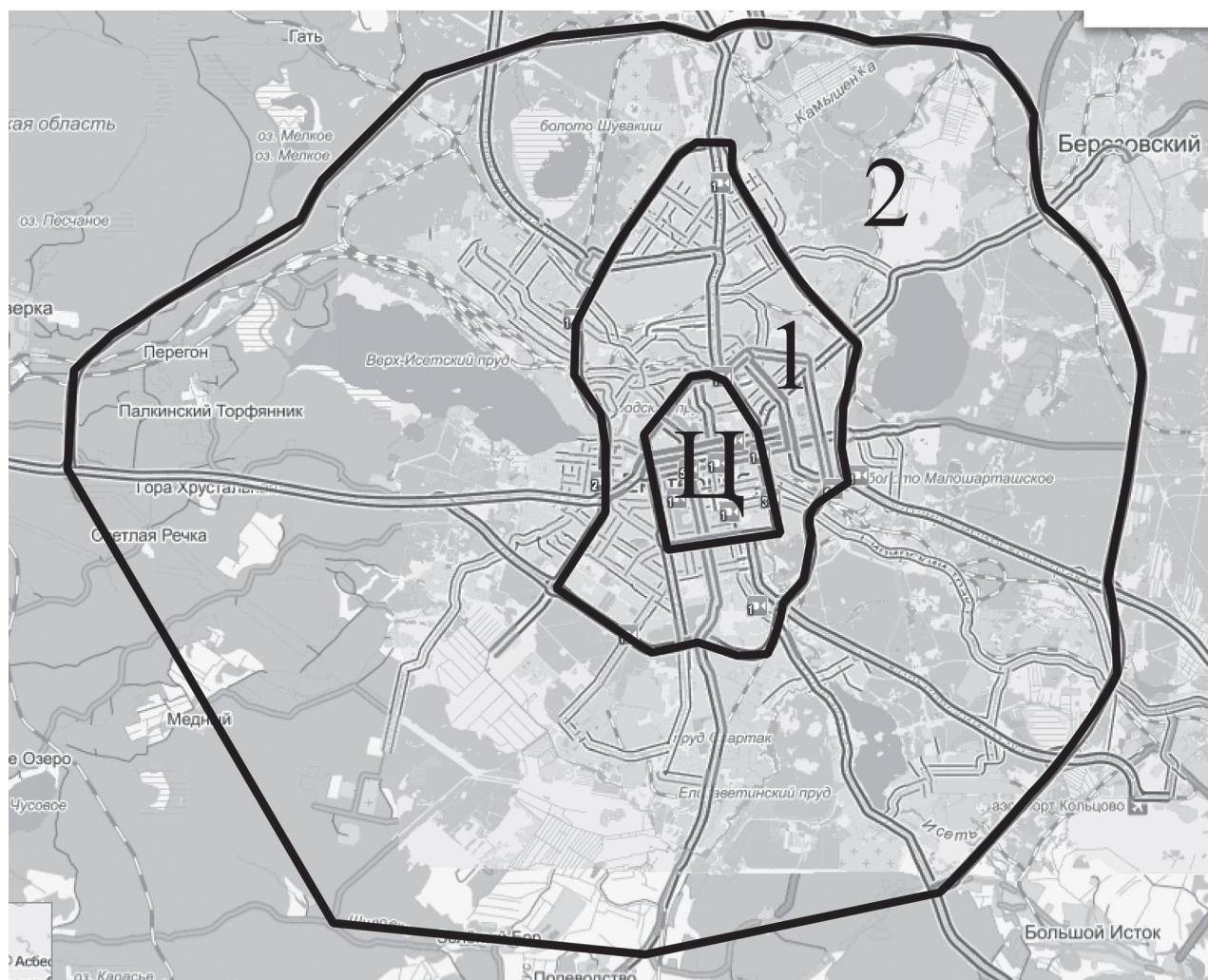


Рис. 1. Транспортные зоны города Екатеринбурга: Ц — центр города, 1 — первая зона, 2 — вторая зона (на основе карт <http://maps.yandex.ru>)

Таблица 1

Характеристики участков улично-дорожной сети города Екатеринбурга

Характеристика	Центр				Зона 1			Зона 2			Итого
	Типы участков дорог										
	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	
Количество улиц и дорог, ед.	4	13	18	46	31	48	2,4	11	26	561	1012
Протяженность, км	13,7	30,2	27,5	24,1	80,6	80,3	153,9	97,1	61,8	395,5	964,9
Площадь проезжей части, км ²	0,2	0,5	0,3	0,1	1,0	0,5	0,9	1,2	0,4	2,4	7,5
Площадь улиц в границах домов, км ²	0,7	1,5	1,2	0,9	3,4	2,9	5,5	4,1	2,2	14,2	36,5
Средняя расчетная интенсивность движения*, авт./час	3300	1300	700	1000	230	2200	950	1000	2400	900	1282
Участки улиц (дорог) с отсутствием защитной растительности*, %	32				28			22			24,9
Участки улиц (дорог) с одним рядом деревьев*, %	48				43			39			41,2
Участки улиц (дорог) от двух до трех рядов деревьев*, %	11				20			29			24,3
Участки улиц (дорог) с прилегающими парками (лесопарками)*, %	9				9			10			9,6
Площадь листовой поверхности придорожной древесной растительности, км ² *	0,2				0,5			1,2			0,9
Площадь листовой поверхности лесопарковой (парковой) древесной растительности, км ² *	5,3				26,0			101,1			67,0

* – Средневзвешенные значения по протяженности улиц (дорог).

выбросов автотранспорта — оксиды азота (по NO₂), оксид углерода (СО).

Наиболее важным входным параметром в модели рассеивания является мощность выброса, определяющая поток загрязняющих веществ в атмосферный воздух (F_p , г/м² с⁻¹):

$$F_p = \omega \times q_{sa}, \quad (1)$$

где: ω — выброс рассматриваемого загрязняющего вещества, г/с; q_{sa} — плотность автомобилей на единицу площади территории (ед./м²):

$$q_{sa} = P_{tf} \cdot L_R / S_a, \quad (2)$$

где: L_R — протяженность улично-дорожной сети, м; P_{tf} — плотность транспортного потока, ед./м; S_a — площадь участка территории, м².

Средняя плотность транспортного потока определялась по следующему соотношению:

$$P_{tf} = N_{inn} / U_{if}, \quad (3)$$

где: N_{inn} — суммарная интенсивность транспортного потока по двум полосам движения, авт./с; U_{if} — средняя скорость транспортного потока, м/с.

Численность транспортных средств, одновременно движущихся по УДС г. Екатеринбурга (Q_p , ед.),

определяли с использованием транспортной модели, основные положения которой приведены в [3], по формуле:

$$Q_t = L_R \cdot P_{tf}, \quad (4)$$

Значения выбросов автотранспорта на УДС оценивались по методике [4]. Выброс рассматриваемого загрязняющего вещества на территории населенных пунктов (ω , г/с) автотранспортными средствами (АТС) соответствующего расчетного типа оценивался при движении АТС по городским улицам и дорогам, а также при пуске и прогреве двигателя после стоянки. Время прогрева двигателя определялось в зависимости от текущей температуры воздуха. При расчете выбросов учитывалась структура парка по экологическому классу [4]. Концентрация загрязняющих веществ (ЗВ) в воздухе непосредственно на УДС определялась с использованием Гауссовой модели рассеяния GFLSM, приведенной в [5].

Оценка концентрации загрязняющих веществ в пассажирских помещениях общественного транспорта производилась на основе аппроксимации данных совместных натуральных измерений концентрации СО в салонах автобусов и на городской УДС. Установленная статистическая связь концентрации СО внутри общественного транспорта $C_{от}$ в зависимости от концентрации на обочине дороги $C_{об}$ имеет вид:

$$C_{OT} = 0,7802 \cdot C_{об}^{1,2033}, R^2 = 0,876, \quad (5)$$

где: C_{OT} — концентрация ЗВ в салонах автобусов, мг/м³; $C_{об}$ — концентрация на обочине, мг/м³; R^2 — коэффициент детерминации.

Для оксидов азота получена аналогичная зависимость.

Уровень загрязнения воздуха СО в *кабинах легковых автомобилей* установлен, как и для салонов автобусов, по результатам натурных измерений в салонах и на проезжей части. Формула оценки концентрации ЗВ в салонах имеет вид:

$$C_{ИТ} = a \cdot C_{Пч}^b = 1,0252 \cdot C_{Пч}^{0,9794}, R^2 = 0,876, \quad (6)$$

где: a и b параметры регрессии, определяемые экспериментально; $C_{ИТ}$ — концентрация загрязняющего вещества в салонах легковых автомобилей, мг/м³; $C_{Пч}$ — концентрация загрязняющего вещества вне легкового автомобиля над проезжей частью, мг/м³. Оценка адекватности зависимостей (5) и (6) выполнялась с использованием метода наименьших квадратов на основе определения значений стандартной ошибки и 95% доверительных интервалов для коэффициентов регрессии модели. Концентрация загрязняющих веществ вне легкового автомобиля оценивалась с использованием блочной модели рассеяния, приведенной в [6].

Источником загрязняющих веществ *вблизи дороги и внутри жилых районов* являются выбросы автотранспорта. В расчетах протяженность квартала принята равной 100 м [2]. Концентрация ЗВ в районе пешеходной зоны и внутри жилого района оценивалась с использованием модели рассеивания [5].

4. Оценка удаления загрязняющих веществ из воздуха на улично-дорожной сети

Количество удаляемых ЗВ рассчитывалось на основе оценки потока (F , г/м² с⁻¹), зависящего от скорости удаления и концентрации загрязняющих веществ:

$$F = C \cdot V, \quad (7)$$

где: C — концентрация ЗВ в воздухе, мг/м³; V — скорость выведения ЗВ, м/с.

5. Оценка эффективности использования фотокатализаторов

Фотокаталитические очистители воздуха (ФКО) предполагается устанавливать в системе вентиляции автомобилей, а фотокаталитические покрытия (TiO₂) наносить на поверхности акустических экранов, тротуаров, фасадов зданий вблизи УДС.

В данном исследовании произведена расчетная оценка эффективности использования фотокатализаторов для удаления (нейтрализации) ЗВ из атмосферного воздуха на УДС и воздуха салонов и кабин автомобилей. Учитывались окислительные свойства катализатора (TiO₂), разработанного в ИК СО РАН, содержащего 0,2% платины [7], под воздействием УФ-излучения.

Параметры потока выведения ЗВ из атмосферного воздуха на УДС определялись на основе данных, полученных экспериментальным путем на автомобильных ФКО в салонах АТС. При этом принимались следующие допущения.

1. За время работы ФКО сохраняют свои свойства — не происходит дезактивация фотокаталитической поверхности.
2. Поток удаления ЗВ зависит от свойств фотокаталитических покрытий. В соответствии с данными [8] эффективность нейтрализации СО составляет $2,1 \cdot 10^{-6}$ г/м² с⁻¹, а оксидов азота — $3,1 \cdot 10^{-6}$ г/м² с⁻¹.
3. При оценке распространения ЗВ от дороги до фотокаталитической поверхности в районе пешеходной зоны и далее последняя формализовалась точечным, а не площадным поглотителем.

6. Удаление загрязняющих веществ из атмосферного воздуха растительностью

Текущее состояние городской лесопарковой и придорожной древесной растительности оценивалось методом пробных площадей в течение сезона с листьями. Оценка удаления ЗВ растительностью проводилась с использованием модели UFORE. В ней использовались данные натурного обследования растительности, загрязнения воздуха и метеорологических условий [9]. Удаление загрязнения растительностью происходит путем сухого осаждения загрязняющих веществ из атмосферного воздуха, а также путем абсорбции.

Скорость выведения загрязняющего вещества вычислена как обратная сумма аэродинамической устойчивости (R_a , с/м), устойчивости квазиламинарного пограничного слоя (R_b , с/м) и устойчивости кроны (R_c , с/м):

$$V_d = 1 / (R_a + R_b + R_c). \quad (8)$$

Параметры R_a, R_b определялись с учетом стратификации приземного атмосферного воздуха [10]. Аэродинамическая устойчивость определена по формуле:

$$R_a = u(z) / u_*^2, \quad (9)$$

где $u(z)$ — средняя скорость ветра, м/с на высоте z и u_* — динамическая скорость, м/с.

Устойчивость кроны дерева к загрязняющим веществам для периода с листьями оценивалась по формуле [9]:

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{r_s + r_m} + \frac{1}{r_t} + \frac{1}{r_{soil}}. \quad (10)$$

Устойчивость кроны (R_c) обеспечивается: устьичной устойчивостью (r_s , м/с), устойчивостью мезофилла (r_m , м/с), кутикулярной устойчивостью (r_p , м/с) и устойчивостью почвы (r_{soil} , м/с).

Определение параметров, связанных с листовой устойчивостью кроны R_c , а также учет суточных и сезонных изменений осуществлялось с использованием расчетной зависимости, определяющей связь устьичной устойчивости (r_s) с фотосинтетическим световым потоком, загрязнением воздуха и метеопараметрами. Удаление СО (R_c) принималось 50000 с/м для сезона с листьями и 1000000 с/м для безлиственного сезона. Для оксидов азота параметр устойчивости мезофилла принимался 100 с/м, а кутикулярная устойчивость 20000 м/с [9].

При проведении натурного обследования учитывалось экологическое состояние древостоя. По результатам расчетов, выполненных на основе характеристик деревьев [11], оценивались площади листовой поверхности городской растительности на базовый период (при средней полноте 50000 ед./км²) (табл. 1).

Предполагалось, что масса удаленного загрязняющего вещества деревьями (кустарниками) пропорциональна фитомассе листьев (хвои). Исходя из этого, на основе литературных данных [11], были выделены характеристики лиственной (хвойной) фитомассы растений в природных условиях (табл. 2). Для формализации характеристик растительности по фитомассе листьев (хвои), в качестве базового древесного растения использовали сосну как наиболее распространенный вид городских лесов. Для оценки фитомассы листьев (хвои), площади и индекса листовой

Таблица 2

Характеристики растительности в природных условиях [11]

Наименование породы	Масса листьев (хвои), кг/дерево	ДВН, см	Высота дерева, м
Лиственница	5,9	13,0	14,0
Ель	5,5	12,0	11,5
Сосна	2,6	16,0	15,0
Береза	4,3	12,6	9,0
Осина и тополи	3,5	13,0	16,0
Липа	1,9	13,7	15,8
Ясень	1,9	14,3	15,3
Клен	1,9	14,6	8,8

поверхности использовали аллометрические уравнения, приведенные в [12].

Пересчет изменения индекса листовой поверхности на другие виды растений осуществлялся сопоставлением фитомассы листьев (хвои) с аналогичными характеристиками других пород деревьев с использованием методики [9].

7. Результаты расчетов и их обсуждение

Параметры математической модели, определяющие удаление загрязняющих веществ с помощью фотокаталитических покрытий, оценивались на основе данных экспериментов с ФКО в салоне автомобиля [8]. Для этого методом наименьших квадратов определяли параметры модели оценки концентрации после очистки (C_{pp} , мг/м³), влияющие на поглощение СО в системе вентиляции автомобиля:

$$C_{pp} = a \cdot \exp(-b \cdot S_k / Q_v), \quad (11)$$

где: a и b — параметры регрессии (табл. 3); S_k — площадь фотокаталитической поверхности, м²; Q_v — расход воздуха через фотокатализатор, м³/с.

Далее, с использованием результатов эксперимента, выражение (11) преобразовывалось для оценки поглощения фотокатализатором на ограждающих УДС поверхностях к виду:

$$C_{pp} = a \exp(-b \cdot L_k / u), \quad (12)$$

где: u — скорость потока воздуха над поверхностью фотокатализатора, м/с; L_k — протяженность прохождения воздушного потока над поверхностью фотокатализатора, м.

Для оценки удаления оксидов азота с использованием фотокаталитических покрытий использована формула:

$$C_{pp} = C_{np} \times \exp[-(a \times I \times S_k) / Q_v]. \quad (13)$$

Методом наименьших квадратов по экспериментальным данным [13] оценивали коэффициент регрессии (a) в модели (табл. 4), где I — поток света на поверхность, Вт/м²; C_{np} — концентрация загрязняющих веществ до использования средств очистки, мг/м³. При этом максимальное отклонение результатов измерений от расчетных значений по полученной зависимости не превысило 20% (рис. 2).

На основе имитационного моделирования стока ЗВ с помощью растительности по методике [9] и данных о количестве и структуре городской древесной растительности на территории в зоне влияния рассматриваемого участка дороги зависимость потока поглощения СО (F_{pu}) от полноты посадки городской

Таблица 3
Параметры поглощения оксида углерода
фотокаталитическими покрытиями

Параметры модели	Оценка параметров	Стандартная ошибка	t-критерий, df = 70	Уровень значимости p	Нижний предел доверительного интервала	Верхний предел доверительного интервала
a	5,262	0,314	16,74	0,00	4,537	5,987
b	0,448	0,025	17,94	0,00	0,391	0,507

придорожной растительности (участок дороги в центре города) имеет вид:

$$F_{pu} = 2 \cdot 10^{-11} \cdot Pt, R^2 = 1, N = 8784, \quad (14)$$

где: Pt — плотность деревьев на участке, ед./м²; N — количество рассматриваемых значений.

Аналогичная зависимость получена при расчете поглощения СО внеуличной — парковой (лесопарковой) растительностью (участок дороги в центре города):

$$F_{pu} = 8 \cdot 10^{-12} \cdot Pt, R^2 = 1, N = 8784. \quad (15)$$

Расчет поступления загрязняющих веществ в атмосферный воздух

По результатам моделирования передвижения АТС по УДС получена зависимость потока поступления СО от автомобилей на УДС (участок дороги в центре города) вида:

$$F_p = 0,000001 \cdot P_{тп} R^2 = 0,9981, N = 8784. \quad (16)$$

При проведении расчетных оценок по приведенным выше формулам управляемыми параметрами являлись численность транспортных средств (источники загрязняющих веществ) и количество деревьев (стоки загрязняющих веществ) (рис. 3, с. 3 обложки) при ограничении сверху по предельно допустимым концентрациям: в рабочей зоне ПДК_{рз}, в воздухе населенных мест максимально разовой ПДК_{мр} и среднесуточной ПДК_{сс}.

Таблица 4
Параметры модели поглощения оксидов азота (NO_x)
фотокаталитизатором

Параметры модели	Оценка параметров	Стандартная ошибка	t-критерий, df = 9	Уровень значимости p	Нижний предел доверительного интервала	Верхний предел доверительного интервала
a	0,085063	0,006656	12,77973	0,00	0,071259	0,098866

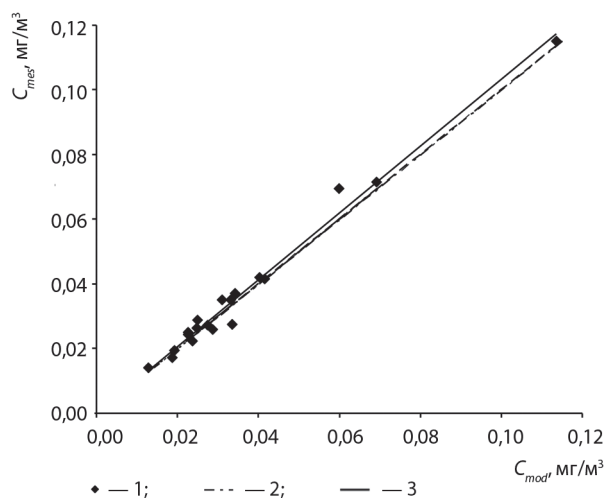


Рис. 2. Концентрация NO_x по экспериментальным данным (C_{mes}) и модельным расчетам (C_{mod}): 1 — измеренные значения, 2 — «нулевая» линия результатов измерений, 3 — аппроксимация результатов расчетных данных по полученной зависимости

Обеспечить допустимый уровень загрязнения воздуха СО на УДС (концентрация менее среднесуточной ПДК_{сс}) возможно при одновременном движении по улично-дорожной сети города не более 12–12,5 тыс. ед. АТС/км². При краткосрочном воздействии ЗВ на участников движения (концентрация СО не превышает ПДК_{мр}) допустимо единовременное движение по территории не более 21–21,5 тыс. ед. АТС/км². Поглощение загрязняющих веществ городской растительностью на базовый расчетный период эквивалентно дополнительному присутствию на улицах города 0,2–0,4% численности движущихся автомобилей без ухудшения качества воздуха по оксиду углерода.

Об эффективности фотокаталитических покрытий можно судить по результатам расчетной оценки изменения концентрации СО от площади активной поверхности фотокатализатора, скорости и расхода воздуха, которая приведена на рис. 4 (с. 3 обложки).

Для обеспечения защиты воздуха в кабине (салоне) АТС от СО с помощью ФКО в системе вентиляции автомобиля, при круглосуточной эксплуатации на улицах города, необходима минимальная площадь активной поверхности фотокатализатора не менее 0,1 м² на легковых автомобилях и 0,5 м² на городских автобусах. При краткосрочном пребывании пассажиров (концентрация СО менее ПДК_{мр}) в автобусах, при нормативной производительности вентиляции, требуется не менее 0,03 м² активной площади фотокатализатора в ФКО.

Использование фотокаталитических покрытий на ограждающих поверхностях УДС (фасады зда-

Таблица 5
Вклад отдельных мероприятий в снижение концентрации загрязняющих веществ на улично-дорожной сети

Мероприятие	Уменьшение концентрации от базовой за год, %	
	СО	NO _x
Использование уличных деревьев (кустарников)	0,14–0,16	0,15–0,18
Использование внеуличных деревьев (кустарников)	0,20–0,40	0,30–0,50
Использование фотокатализатора в пешеходной зоне	2,50–3,90	0,50–2,30
Использование ФКО в системе вентиляции АТС	2,00–2,70	1,50–2,80

ний, тротуары, акустические экраны) эффективно при длине пробега загрязненного воздуха не менее 5 м при средней скорости воздушного потока над поверхностью более 0,1 м/с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофименко Ю.В., Ворожнин В.С. Природно-совместимая технология по снижению загрязнения воздуха на улично-дорожной сети крупного города (на примере Екатеринбурга) // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сборник трудов участников одиннадцатой междунар. науч.-практ. конф. / СПбГАСУ. — СПб., 2014. — С. 344–349.
2. ГОСТ Р 52398–2005 Классификация автомобильных дорог. Основные параметры и требования. — М.: Стандартинформ, 2006. — 4 с.
3. Трофименко Ю.В., Якимов М.Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов: монография. — М.: Логос, 2013. — 464 с.
4. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ от автотранспортных средств на территории крупнейших городов. — М.: Автополис-плюс, 2008. — 80 с.
5. Luhar A.K., Patil R.S. A general finite line source model for vehicular pollution prediction. Atmospheric Environment. — 1989. — Vol. 23. — P. 555–562.
6. Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 448 с.
7. Козлов Д.В., Трофименко Ю.В., Дубовицкая В.П., Воронцов А.В. Фотокаталитическая очистка воздуха от автомобильных загрязнителей // Катализ в промышленности. — 2006. № 6. — С. 19–27.

REFERENCES

1. Trofimenko Yu.V., Vorozhnin V.S. Prirodno-sovmestimaya tekhnologiya po snizheniyu zagryazneniya vozdukha na ulichno-dorozhnoy seti krupnogo goroda (na primere Ekaterinburga) [Natural-compatible technology to reduce air

В таблице 5 приведены результаты комплексной оценки снижения загрязнения воздуха на УДС при реализации рассматриваемых мероприятий. При этом учитывался ежегодный прирост фитомассы растений, наличие ФКО на всех поставляемых в парк АТС и дополнительное искусственное освещение фотокаталитических поверхностей в районе пешеходных зон наиболее загрязненных участков (20 000 м²/год с каждой стороны улицы).

8. Заключение

Полученные результаты показали, что совместное использование зеленых насаждений и фотокаталитических очистителей в салонах автомобилей и фотокаталитических покрытий на объектах обустройства городских дорог и улиц позволит снизить в воздухе на УДС концентрацию СО от 0,14 до 6 %, оксидов азота от 0,15 до 5,78 %.

8. Григорьева Т.Ю. Повышение надежности транспортных человеко-машинных систем управления на примере городских автобусов: дис. ... кандидата тех. наук: 05.22.10. — М.: МАДИ (ГТУ), 2006. — 141 с.
9. Nowak, D.J., Crane, D.E., 2000. The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban forest structure and functions. In: Hansen, M., Burk, T. (Eds.), Proceedings: Integrated Tools for Natural Resources Inventories in the 21st Century. IUFRO Conference, 16–20 August 1998, Boise, ID. Gen. Tech. Report NC-212. US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, St. Paul, MN, P. 714–720.
10. Ворожнин В.С., Маркелов Ю.И., Давыдов В.Б., Тетерин А.Ф., Поддубный В.А. Определение метеорологических параметров в модели рассеивания от автомагистрали // Вестник НГГУ серия «Естественные науки и науки о Земле». №1 — Нижневартовск: Нижневарт. гос. гуманит. ун-т, 2012. — С. 15–20.
11. Усольцев В.А. Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. — 570 с.
12. Widlowski Jean-Luc, Verstraete M., Pinty B., Gobron N. Allometric Relationships of Selected European Tree Species EUR 20855. EC Joint Research Centre, TP 440 I-21020 Ispra (VA), Italy. — 2003. — 70 p.
13. Ballari M.M., Brouwers H.J.H. Full scale demonstration of air-purifying pavement // Journal of Hazardous Materials. — 2013. — Vol. 254–255. — P.406–414. DOI:10.1016/j.jhazmat.2013.02.012

pollution on the road network of a large city (on the example of Yekaterinburg)]. *Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya v krupnykh gorodakh: sbornik trudov uchastnikov odinnadtsatoy mezhdunar. nauch.-prakt. konf.*

- [Organization and road safety in the major cities: Proceedings of participants Eleventh Intern. scientific and practical. Conf.]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2014, pp. 344–349.
2. GOST R 52398–2005 *Klassifikatsiya avtomobil'nykh dorog. Osnovnye parametry i trebovaniya* [GOST R 52398–2005 Classification of highways. Main parameters and requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2006. 4 p.
 3. Trofimenko Yu.V., Yakimov M.R. *Transportnoe planirovaniye: formirovaniye effektivnykh transportnykh sistem krupnykh gorodov* [Transport planning: Efficient transport systems of large cities]. Moscow, Logos Publ., 2013. 464 p.
 4. *Raschetnaya instruktsiya (metodika) po inventarizatsii vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv ot avtotransportnykh sredstv na territorii krupneyshikh gorodov* [Settlement Instruction (methodology) inventory of pollutant emissions from motor vehicles in the territory of the largest cities]. Moscow, Avtopolis-plyus Publ., 2008. 80 p.
 5. Luhar A.K., Patil R.S. A general finite line source model for vehicular pollution prediction. *Atmospheric Environment*. 1989, Vol. 23, pp. 555–562.
 6. Berlyand M.E. *Sovremennyye problemy atmosfery i zagryazneniya atmosfery* [Modern problems of atmospheric diffusion and air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 448 p.
 7. Kozlov D.V., Trofimenko Yu.V., Dubovitskaya V.P., Vorontsov A.V. Fotokataliticheskaya ochestka vozdukhа ot avtomobil'nykh zagryazniteley [Photocatalytic air purification of automobile pollutants]. *Kataliz v promyshlennosti* [Catalysis in Industry]. 2006, I. 6, pp. 19–27.
 8. Grigor'eva T.Yu. *Povysheniye nadezhnosti transportnykh cheloveko-mashinnykh sistem upravleniya na primere gorodskikh avtobusov. Kand. Diss.* [Improving the reliability of transport of man-machine control systems on the example of city buses. Cand. Diss.]. Moscow, MADI (GTU) Publ., 2006. 141 p.
 9. Nowak, D.J., Crane, D.E., 2000. The Urban Forest Effects (UFORE) Model: quantifying urban forest structure and functions. In: Hansen, M., Burk, T. (Eds.), *Proceedings: Integrated Tools for Natural Resources Inventories in the 21st Century*. IUFRO Conference, 16–20 August 1998, Boise, ID. Gen. Tech. Report NC-212. US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Research Station, St. Paul, MN, P. 714–720.
 10. Vorozhnin V.S., Markelov Yu.I., Davydov V.B., Teterin A.F., Poddubnyy V.A. *Opreделение meteorologicheskikh parametrov v modeli rasseivaniya ot avtomagistrali* [Determination of meteorological parameters in the dispersion model from the motorway]. *Vestnik NGGU seriya «Estestvennyye nauki i nauki o Zemle»* [Bulletin NGGU series "Science and Earth sciences"]. 2012, I. 1, pp. 15–20.
 11. Usol'tsev, V.A. *Fitomassa i pervichnaya produktsiya lesov Evrazii* [Phytomass and primary production forests of Eurasia]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 2010. 570 p.
 12. Widlowski Jean-Luc, Verstraete M., Pinty B., Gobron N. *Allometric Relationships of Selected European Tree Species* EUR 20855. EC Joint Research Centre, TP 440 I-21020 Ispra (VA), Italy. 2003. 70 p.
 13. Ballari, M.M., Brouwers, H.J.H. Full scale demonstration of air-purifying pavement. *Journal of Hazardous Materials*. 2013. Vol. 254–255. P.406–414. DOI:10.1016/j.jhazmat.2013.02.012.

Air Purification Efficiency Assessment on Large City's Street Road Network by Green Plantings and Photocatalytic Cleaners

Yu.V. Trofimenko, Head of Chair, Doctor of Engineering, Professor, The Moscow State Automobile & Road Technical University – MADI

V.S. Vorozhnin, Junior Researcher, Industrial Ecology Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

V.B. Davydov, Researcher, Ph.D. of Physics and Mathematics, Industrial Ecology Institute, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

S.S. Zubova, Senior Lecturer, Ph.D. of Agriculture, Uralsky State Forest Engineering University (USFEU)

Methods for organization of air purification on Yekaterinburg city's street road network are considered. Air pollution by motor transport and a polluting substances stream to the car salon are estimated with a use of the received consistent patterns, dispersive models, transport streams' characteristics, and data on current weather conditions. On a streams' balance basis a permissible density of cars (on the non-exceedance of CO maximum permissible threshold) on the city's territory (no more than 12-12.5 cars/sq. km) taking into account their emissions and work of photocatalytic cleaners in vehicles' salons and photocatalytic coverings on the street road network surfaces (acoustic screens, sidewalks, buildings), and also due to processing of the polluting substances by different types of wood vegetation (protective forest strips, parks and forest parks) has been established. It has been defined that the removal of CO by means of available city vegetation is equivalent to additional presence on the city's streets of 0.2-0.4 % of cars of the operated transport's total number without air deterioration. A necessary area of an active surface for photocatalytic cleaners in the car salon (0.1 sq. m), bus salon (0.5 sq. m), and also a width of protecting surfaces with the deposited photocatalytic coverings near the pedestrian zone (5m) are estimated in this work. It has been established that sharing of the considered cleaning methods is capable to lead to annual decrease of carbon oxide from 0.14 to 6 %, and nitrogen oxides from 0.15 to 5.78 % in average concentration around the city.

Keywords: motor transport, street road network, air, cleaning, green plantings, photocatalytic cleaners.