

На правах рукописи



Деянов Денис Александрович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭНЕРГО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА УЛИЧНО-
ДОРОЖНОЙ СЕТИ КРУПНОГО ГОРОДА**

Специальность 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» на кафедре «Инженерно-экологические инновации и комплексная безопасность».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Трофименко Юрий Васильевич
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», заведующий кафедрой «Инженерно-экологические инновации и комплексная безопасность»

Официальные оппоненты: **Ложкин Владимир Николаевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Пожарной аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства»
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России»

Донченко Вадим Валерианович
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора центра развития транспорта общего пользования Передовой инженерной школы «Академия ВСМ»
ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научный центр по комплексным транспортным проблемам Министерства транспорта Российской Федерации» (ФГБУ «Научный центр Минтранса России»)**

Защита диссертации состоится 5 июня 2026 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета 99.2.114.02 на базе ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» и ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) по адресу: 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64, ауд. 42.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) и на официальных сайтах: <https://madi.ru>, <https://www.mstuca.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации, направлять в диссертационный совет по адресу: 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64, ауд. 41.
Телефон: 8(499)346-01-68 доб. 1324
E-mail: uchsovet@madi.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Мельникова Татьяна Евгеньевна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В динамично развивающихся городах транспортные системы оказывают значительное влияние на здоровье жителей, мотивацию их поведения, уровень благосостояния, комфорта, безопасности, экологического благополучия, что в итоге отражается на качестве жизни.

Реализация тренда на устойчивое низкоуглеродное развитие транспортных систем, связанного с развитием информационно-коммуникационных технологий, средств индивидуальной мобильности, электрических, высокоавтоматизированных транспортных средств при ожидаемом росте объемов перевозок предполагает формирование более высоких требований к их энерго-экологической эффективности.

Между тем, методики оценки энергопотребления и выбросов парниковых газов (ПГ) транспортной системой крупного города с транспортными потоками, состоящими из транспортных средств с разными типами энергоустановок (по виду топлива, энергии), являются упрощенными и нуждаются в совершенствовании.

По мере увеличения площади территории городов сложность мониторинга передвижных источников выбросов ПГ существенно возрастает. Традиционные методы учета выбросов ПГ, других вредных веществ с трудом справляются с потребностями мониторинга в реальном времени крупномасштабных, динамичных и меняющихся транспортных систем и инфраструктуры. Особенно когда на определенной площади территории находится одновременно несколько сетей разных видов транспорта с движущимися транспортными средствами. Как получить и объединить данные в разных временных и пространственных масштабах, разработать динамически корректируемую модель расчета выбросов ПГ в режиме реального времени? При этом результаты расчетов должны иметь требуемый уровень достоверности и быть доступны. Данные обстоятельства предопределили выбор темы, постановку цели и задач диссертационного исследования.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы оценки энерго-экологической эффективности транспортных средств и транспортных потоков на улично-дорожной сети (УДС) посвящены исследования Луканина В.Н.,

Трофименко Ю.В., Буслаева А.П., Яшиной М.В., Ложкина В.Н., Ложкиной О.В., Якимова М.Р., Шелмакова С.В., Кутенева В.Ф., Токарева А.А., Головных И.М., Московкина В.В., Максимова В.А., Захарова Н.С. и других.

Цель диссертационной работы – разработка и апробация методики оценки энергопотребления, выбросов ПГ транспортной системой с транспортными потоками, состоящими из транспортных средств с разными типами энергоустановок (по виду топлива, энергии).

Задачи диссертационного исследования:

– Провести анализ существующих методов оценки энерго-экологической эффективности одиночных транспортных средств, транспортных потоков, транспортных систем, выявить их системные недостатки и обосновать необходимость применения современных инструментов математического и имитационного моделирования.

– Проанализировать существующие и разработать новую структуру состава транспортного потока по типам транспортных средств и видам используемого топлива (энергии), оценить влияние детализации этой структуры на точность расчета энергопотребления транспортным потоком.

– Разработать комплексную методику оценки энергопотребления и выбросов ПГ транспортными потоками на УДС крупного города, состоящими из ТС с разными типами энергоустановок, позволяющая рассчитывать удельные (на единицу транспортной работы) и валовые (прямые и косвенные) значения топливопотребления и выбросов ПГ транспортными потоками.

– Организовать и провести натурное обследование транспортных потоков для формирования блока исходных данных и установления значений показателей, необходимых для верификации и валидации результатов, полученных с использованием разработанной методики.

– Провести апробацию разработанной методики, путем выполнения сценарного прогноза выбросов ПГ транспортными потоками на перспективу до 2030 года по альтернативным сценариям развития транспортной системы крупного

города. Провести валидацию разработанной методики путем сравнения с результатами, полученными по общепризнанной методике.

– Адаптировать методику для решения разных задач, включая подтверждение соответствия транспортных проектов критериям «зеленого» финансирования, и разработать инженерный вариант для практического использования.

Объект исследования: транспортная система крупного города с транспортными потоками, состоящими из одиночных транспортных средств с разным типом энергоустановок (видом используемого топлива, энергии), городского электротранспорта (трамваи, троллейбусы, электробусы).

Предмет исследования: методы оценки энергопотребления, прямых и косвенных выбросов ПГ одиночными транспортными средствами и транспортными потоками на УДС.

Методы исследования. Математический, статистический и системный анализ, имитационное моделирование.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика оценки энергопотребления и выбросов ПГ одиночными транспортными средствами, транспортными потоками, позволяющая обеспечить переход от результатов расчетных оценок, полученных в типизированном ездовом цикле (WLTP), к реальным условиям эксплуатации ТС в транспортных потоках на УДС с учетом изменяющейся структуры парка по виду топлива (энергии).

2. Выполнена оценка энерго-экологической эффективности разных сценариев развития транспортной системы крупного города (использование на ТС тягового электропривода и переход на пассажирский транспорт общего пользования) путем оценки прямых и косвенных валовых выбросов парниковых газов и удельных показателей (на единицу транспортной работы) транспортными потоками на УДС. Выявлено разнонаправленное влияние рассматриваемых сценариев на энерго-экологическую эффективность развития городской транспортной системы.

3. Разработана и апробирована на реальном участке УДС авторская структура транспортного потока, адаптированная для задач энерго-экологической оценки, сочетающая в себе минимально достаточный уровень детализации и компактность для практического применения с использованием данных государственной статистической отчетности.

4. Установлены достоверные зависимости:

– базового расхода топлива (энергии) сгруппированных по виду используемого топлива транспортных средств от комплексного показателя К, который включает в себя снаряженную массу транспортного средства, рабочий объем цилиндра (для двигателей с ДВС) и фактор обтекаемости;

– коэффициента аэродинамического сопротивления конструкций ТС в зависимости от типа кузова и года выпуска транспортного средства на основе анализа изменения коэффициента аэродинамического сопротивления 579 моделей пассажирских и грузовых автомобилей полной массой до 3,5 т за период с 1970 по 2025 год.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты работы могут быть реализованы в виде методик и компьютерных программ, которые позволяют оценить энергопотребление и выбросы ПГ наземным транспортом в городских транспортных системах, влияние на эти показатели разных факторов. Они использовались для установления базовых норм расхода электроэнергии 46 марок легковых автомобилей с тяговым электроприводом и были внесены в текст Распоряжения Минтранса России от 14.03.2008 N АМ-23-р (ред. от 30.09.2021).

Положения, выносимые на защиту:

1. База данных, состоящая из 3000 моделей одиночных колесных транспортных средств с различными типами энергоустановок по виду топлива (энергии), содержащая их основные технико-эксплуатационные показатели.

2. Регрессионные зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления в зависимости от типа кузова и года выпуска транспортного средства.

3. Регрессионные зависимости базового расхода топлива (энергии) сгруппированных по виду используемого топлива транспортных средств от комплексного показателя К.

4. Авторская структура транспортного потока по типу ТС и виду используемого топлива (энергии).

5. Комплексная методика оценки энергопотребления и выбросов ПГ транспортными потоками на УДС крупного города.

6. Матрицы значений удельного расхода топлива транспортным потоком для типичного состава потока по виду топлива, интенсивности движения на одну полосу движения и средней скорости транспортного потока.

7. Результаты сценарного прогноза энерго-экологической оценки эффективности развития транспортной системы города Москвы.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Объект, предмет и область исследования соответствуют научной специальности 2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте, а именно пункту 12. Защита окружающей среды от загрязняющего воздействия транспорта.

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Основные результаты исследования были доложены, обсуждены и одобрены на 79-й, 80-й, 81-й, 82-й, 84-й научно-методических и научно-исследовательских конференциях МАДИ (Москва, 2021–2026 годы), международной научно-технической конференции «Автомобиле- и тракторостроение» (Минск, БНТУ, 2022 год), IX Международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» (Орел, ОГУ им. И.С. Тургенева, 2023 год), Международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса» (Москва, МАДИ, 2023 год).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных трудов, в том числе 2 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования

Российской Федерации, 7 статей в других научных изданиях. Получено 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ. В печатных работах подробно изложено содержание всех основных разделов диссертации, выводы и результаты работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и четырех приложений. Общий объем составляет 143 страницы машинного текста, включающего в себя 48 таблиц и 26 рисунков. Библиографический список содержит 77 наименований, в том числе 22 источника на иностранном языке.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыты актуальность темы исследования, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приведены анализ состояния вопроса и постановка задач исследования. Основной результат этого этапа – возможность корректной формулировки цели и задач исследования.

Проанализированы существующие методики нормирования расхода топлива (энергии) и выбросов ПГ одиночными колесными транспортными средствами, транспортными потоками.

Установлено, что существует необходимость разработки более совершенной методики, интегрирующей лучшие отечественные практики и международный опыт, а также активно использующей современные технологии сбора данных и математического моделирования для достоверной оценки энерго-экологических показателей отдельных марок и моделей автомобилей, транспортных потоков и транспортной системы в целом.

Во второй главе приведена комплексная методика повышения энерго-экологической эффективности транспортных потоков на УДС крупного города.

Одной из составляющих комплексной методики является вариант инженерной оценки энергопотребления одиночных транспортных средств,

построенный на основе анализа литературы и сформированной базы данных с основными конструкционными, технико-эксплуатационными характеристиками свыше 600 моделей пассажирских и грузовых ТС полной массой до 3,5 т при использовании в ДВС бензина (484 модели ТС), дизельного топлива (95 моделей ТС) и электроэнергии (62 модели ТС).

С использованием этих данных сформирован комплексный показатель K , который для ТС с ДВС имеет вид:

$$K = M \times V_{ц} \times D, \quad (1)$$

где M – снаряженная масса, кг; $V_{ц}$ – объем цилиндра, л; D – фактор обтекаемости.

Комплексный показатель для электромобилей имеет вид:

$$K = M \times D, \quad (2)$$

Фактор обтекаемости (D) рассчитывается по формуле:

$$D = 0,5 \times C_x \times F_M \times \rho, \quad (3)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления; его значение для легковых автомобилей находится в интервале от 0,25 до 0,45; F_M – площадь Миделя, м²; ρ – плотность воздуха, кг/м³.

В работе выполнен анализ изменения коэффициента аэродинамического сопротивления 579 моделей пассажирских и грузовых ТС полной массой до 3,5 т за период с 1970 по 2025 год, имеющих 11 типов кузовов, ТС с тяговым электродвигателем. Установлены достоверные зависимости его изменения от года выпуска ТС с разными типами кузовов, которые приведены в таблице 1.

Площадь Миделя рассчитывается по формуле:

$$F_M = 0,81 \times B \times H, \quad (4)$$

где B – габаритная ширина автомобиля, м; H – габаритная высота автомобиля, м.

Таблица 1 – Зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления (C_x) ТС с разными типами кузовов от года выпуска

| Тип кузова | Формула C_x | Коэффициент детерминации |
|---|-------------------------------|--------------------------|
| Седан, лифтбэк, купе, кабриолет и фастбэк | $C_x = -4.044\ln(G) + 31.092$ | 0,983 |
| Хэтчбек | $C_x = -4.125\ln(G) + 31.709$ | 0,988 |
| Универсал, гран туризмо, лимузин и тарга | $C_x = -4.556\ln(G) + 34.995$ | 0,989 |
| Кроссовер (SUV) | $C_x = -5.359\ln(G) + 41.143$ | 0,988 |
| Пикап | $C_x = -2.984\ln(G) + 23.14$ | 0,978 |
| Внедорожник, микроавтобус и фургон | $C_x = -8.204\ln(G) + 62.815$ | 0,976 |
| Минивэн (MPV) | $C_x = -4.266\ln(G) + 32.802$ | 0,976 |

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, G – год выпуска транспортного средства.

С использованием приведенных в формулах (1 – 4) данных и базовых норм расхода топлива по нормативной методике¹ с учетом группировки транспортных средств по виду топлива, были получены достоверные зависимости базового расхода топлива (энергии) от комплексного показателя K , которые приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Формулы для расчета базового расхода топлива (энергии)

| Тип ТС | Формула C_x | Коэффициент детерминации |
|---|--|--------------------------|
| Легковые электромобили полной массой менее 2000 кг., кроме Tesla | $Q_B = 2 \times 10^{-6} \times K^2 + 0,0107 \times K + 9,0597$ | 0,889 |
| Легковые электромобили полной массой свыше 2000 кг., кроме Tesla | $Q_B = 9 \times 10^{-6} \times K^2 + 0,0085 \times K + 21,762$ | 0,965 |
| Легковые электромобили производства компании Tesla | $Q_B = 0,0126 \times K + 12,786$ | 0,888 |
| Для легковых автомобилей, грузовых автомобилей и автобусов полной массой до 3,5 тонн, оборудованных бензиновыми ДВС | $Q_B = 0,9524 \times K^{0,3187}$ | 0,875 |
| Для легковых автомобилей, грузовых автомобилей и автобусов полной массой до 3.5 тонн, оборудованных дизельными ДВС | $Q_B = 0,535 \times K^{0,361}$ | 0,81 |

Примечание: Q_B - базовая норма расхода топлива, л/100км; K – комплексный показатель, рассчитываемый по формуле 1 или 2.

К сожалению, выявить достоверные зависимости удельного (на 100 км пути) расхода топлива разных типов грузовых ТС и автобусов полной массой более 3,5 т в ездовых циклах не удалось. Для достижения поставленных в диссертации задач

¹ Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 № АМ-23-р (ред. от 30.09.2021) "О введении в действие методических рекомендаций "Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте" | Министерство транспорта Российской Федерации | Министерство транспорта Российской Федерации – URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/2/13592>

использована база данных MARLIS², (HBEFA 3.1), полученных расчетно-экспериментальным путем независимыми лабораториями, которая содержит информацию о пробеговых выбросах основных загрязняющих веществ (CO, CO₂, H_xC_y, NO_x, PM) пассажирских и грузовых ТС полной массой более 3,5 т в городском, загородном и смешанном ездовых циклах движения WLTC, экологических классов 0 – 6 с разными системами подавления выбросов, разделенных на 8 групп по полной массе.

Пересчет пробеговых выбросов в удельный расход топлива производился с помощью формулы «баланса углерода»:

$$G_T = \frac{C_{CO_2} \times E_{CO_2} + C_{CO} \times E_{CO} + C_{CH} \times E_{CH} + C_{PM} \times E_{PM}}{C_q \times \rho_T \times 10}, \text{ л/км} \quad (5)$$

где C_{CO₂}, C_{CO}, C_{CH}, C_{PM} – содержание углерода в диоксиде углерода, оксиде углерода, углеводородах, дисперсных частицах (PM) соответственно, %; E_{CO₂}, E_{CO}, E_{CH}, E_{PM} – пробеговые выбросы CO, CO₂, H_xC_y, NO_x, PM соответственно, г/км; ρ_T – плотность топлива при 20°C, кг/л.

В таблицах 3, 4 приведены значения удельного расхода топлива грузовых автомобилей и автобусов разных категорий по полной массе и экоклассу.

Таблица 3 – Базовый расход топлива (л/100 км) грузовых автомобилей разных категорий с использованием данных базы MARLIS

| Полная масса, т | Экологический класс (Евро) | | | | | | | | |
|-----------------|----------------------------|------|------|------|--------|---------|--------|---------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 EGR* | 4 SCR** | 5 EGR* | 5 SCR** | 6 |
| >3,5<=7,5 | 13,1 | 11,4 | 11,1 | 11,5 | 11,6 | 11,2 | 11,7 | 11,2 | 10,7 |
| >7,5>12 | 17,6 | 15,9 | 15,5 | 16,1 | 16 | 15,5 | 16,1 | 15,5 | 14,8 |
| >12>14 | 18,8 | 16,9 | 16,4 | 17 | 16,9 | 16,3 | 17 | 16,3 | 15,5 |
| >14>20 | 22,9 | 19,6 | 19,1 | 19,8 | 19,4 | 18,8 | 19,6 | 18,7 | 17,9 |
| >20>26 | 27,2 | 24 | 23,5 | 24,1 | 23,9 | 23,1 | 24 | 23,1 | 22,1 |
| >26>28 | 28,9 | 25,5 | 25,1 | 25,7 | 25,3 | 24,6 | 25,5 | 24,5 | 23,6 |
| >28>32 | 33 | 29,3 | 29,1 | 29,8 | 29,4 | 28,6 | 29,6 | 28,5 | 27,5 |
| >32 | 32,7 | 29,1 | 28,6 | 29,2 | 29 | 28,2 | 29,2 | 28,1 | 27 |

*EGR – Exhaust Gas Recirculation – Система рециркуляции отработавших газов

**SCR – Selective Catalytic Reduction – Селективное каталитическое восстановление (жидкость AdBlue)

Таблица 4 – Базовый расход топлива (л/100 км) городских и междугородних автобусов разных категорий с использованием данных базы MARLIS

| Полная масса, т | Экологический класс (Евро) | | | | | | | | |
|-----------------|----------------------------|------|------|------|--------|---------|--------|---------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 EGR* | 4 SCR** | 5 EGR* | 5 SCR** | 6 |
| ГА <= 15 | 26 | 21,7 | 21,2 | 22,2 | 22,1 | 21,5 | 22,4 | 21,5 | 21,3 |
| ГА > 15 <= 18 | 32,2 | 28,6 | 28,3 | 29,4 | 29,4 | 28,6 | 29,7 | 28,6 | 28,5 |
| ГА > 18 | 42 | 37,4 | 37,2 | 38,2 | 39 | 37,9 | 39,3 | 37,7 | 37,5 |
| МА <= 18 | 24,8 | 22,9 | 23,1 | 24,9 | 24,8 | 24 | 25,2 | 24,1 | 23 |
| МА > 18 | 30,7 | 27,4 | 27,3 | 27,5 | 27,5 | 26,6 | 28,1 | 26,9 | 26,5 |

² HBEFA Software | HBEFA - Handbook Emission Factors for Road Transport – URL: <https://www.hbefa.net/en/software>

Кроме инженерной методики определения расхода топлива одиночных ТС в диссертационном исследовании разработан ее более детальный вариант, основанный на математическом моделировании движения одиночных ТС и заключающийся в решении уравнения тягового баланса автомобиля.

Для решения поставленных задач обоснована авторская структура транспортного потока, состоящая из 14 модельных групп, состоящих из «эталонных» (наиболее представленных в потоке) моделей ТС (таблица 5).

Таблица 5 – Авторская структура транспортного потока, используемая в методике

| № п/п | Классификация ТС | Модель эталонного ТС |
|-------|------------------------|----------------------|
| 1 | Mini | Daewoo Matiz |
| 2 | Small | Nissan Note |
| 3 | Medium | Hyundai Creta |
| 4 | Large | KIA Sorento |
| 5 | Легковые электромобили | Tesla Model S |
| 6 | N1 | ГАЗель NEXT |
| 7 | N2 | MAN LE 8.180 |
| 8 | N3 | КамАЗ 65117 |
| 9 | Грузовые электромобили | DAF LF Electric |
| 10 | M2 | Iveco Daily 50C15 |
| 11 | M3 | ЛиАЗ 5292.65 |
| 12 | Электробусы | КАМАЗ 6282 |
| 13 | Троллейбусы | ЗиУ-9 |
| 14 | Трамваи | Витязь |

Она сочетает в себе детализацию, необходимую для обеспечения точности расчетов (разделение легковых автомобилей на 4 класса по классификации COPERT³ и выделение электромобилей), и компактность, удобную для практического применения.

Для расчетов энерго-экологической эффективности транспортных потоков выбраны эталонные транспортные средства – наиболее часто встречающееся транспортное средство в выбранной расчетной модельной группе, модели которых приведены в таблице 5. Каждая группа транспортных средств может быть разделена по виду топлива (бензин, дизельное топливо, электротяга).

Блок-схема оценки энергопотребления транспортным потоком по разработанной методике приведена на рисунке 1.

³ COPERT Version 5 | COPERT | Calculations of Emissions from Road Transport – URL: <https://copert.emisia.com/copert/download/>

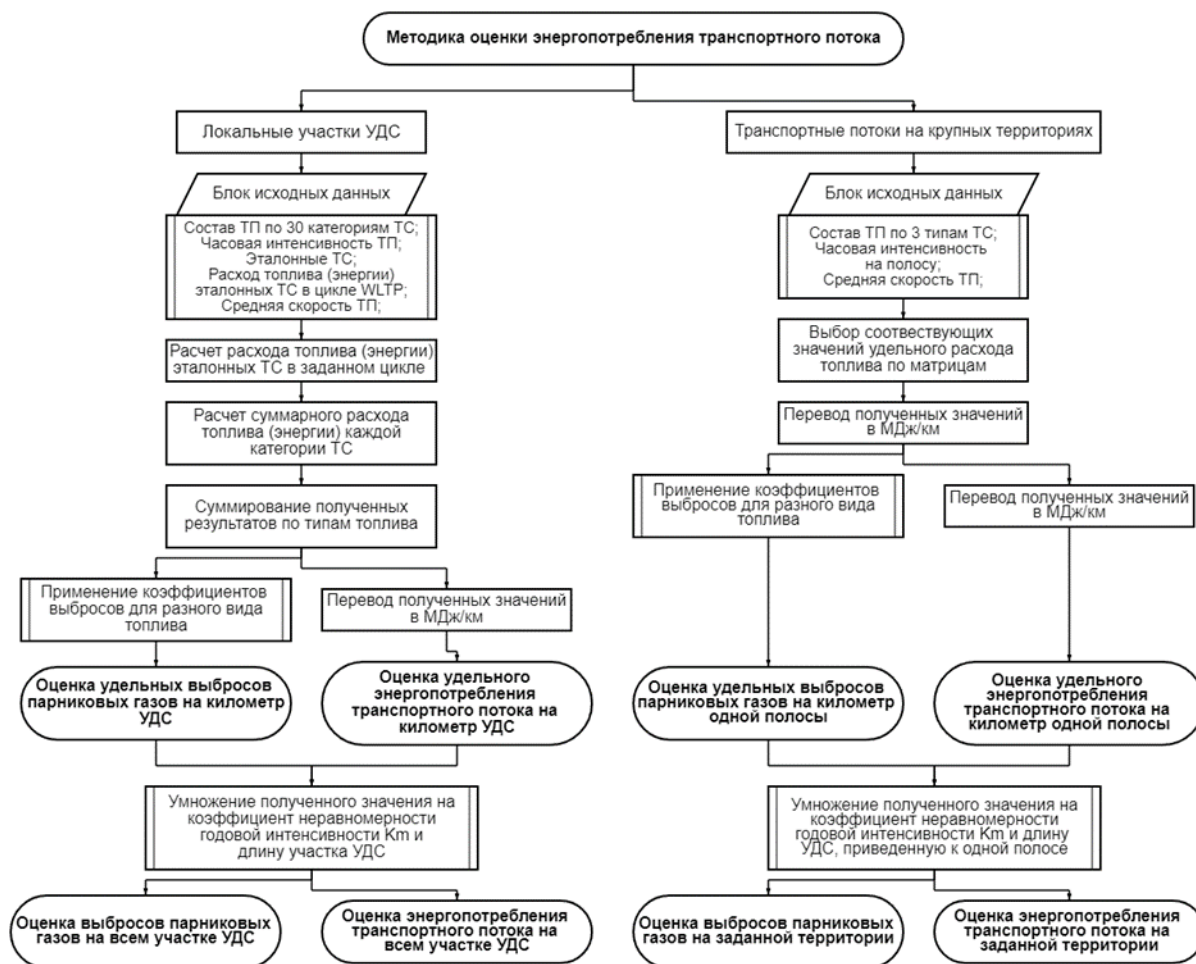


Рисунок 1 – Блок-схема методики оценки энергопотребления транспортным потоком *Детализированный вариант методики*. Данный вариант позволяет рассчитать энергопотребление (удельный расход топлива разного вида) транспортного потока как на отдельном участке, так и всей УДС крупного города с достаточно высокой степенью точности за счет использования детальной классификации транспортных средств, возможности менять марочный состав эталонных транспортных средств.

Оценка удельного (на единицу пробега) расхода топлива разного вида (энергии) для каждой расчетной группы ТС с использованием эталонных транспортных средств в транспортном потоке при моделировании движения в ездовом цикле WLTP или цикле произвольной формы выполняется по формуле:

$$Q_{i \text{ категории.}} = \sum (Q_{\text{ц}} \times l_i) / 100, \text{ л/км} \quad (6)$$

где $Q_{\text{ц}}$ – энергопотребление (удельный расход топлива) эталонного транспортного средства i -ого типа в цикле WLTP или цикле произвольной формы,

л/100 км; I_i – интенсивность движения ТС i -ого типа.

Для получения удельного расхода топлива эталонного транспортного средства в произвольном цикле движения необходимо к удельному расходу Q_u применить повышающий/понижающий коэффициенты $k_1 – k_3$.

Для установления понижающих и повышающих коэффициентов цикл WLTP был разложен на фазы (Low, Medium, High, Extra High). Процедура испытания по данному циклу разделена на 3 класса в зависимости от типа испытуемого транспортного средства (рис. 2).

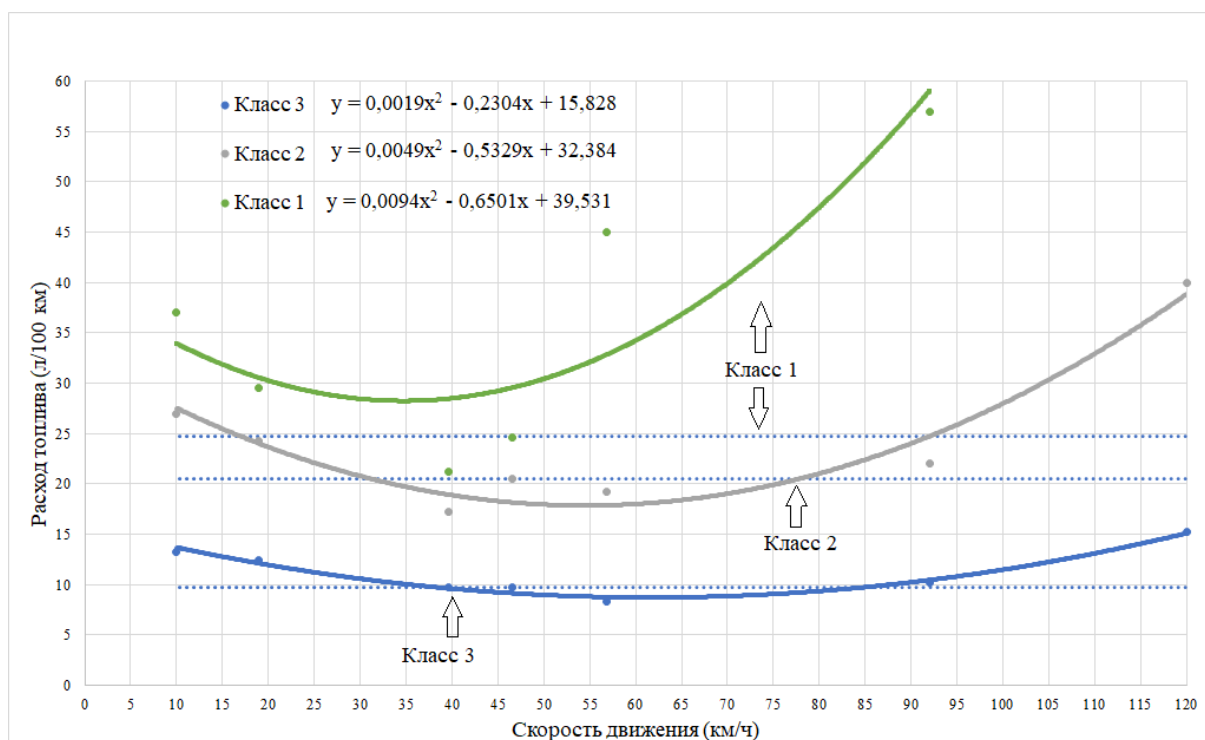


Рисунок 2 – Зависимость среднего расхода топлива транспортного потока (л/100км) от средней скорости движения (км/ч)

Для каждого класса были установлены зависимости средней скорости от расхода топлива, понижающие и повышающие коэффициенты с привязкой к режимам движения в цикле WLTP.

В качестве удельного (на единицу пути) расхода топлива ТС принимается значение расхода топлива в цикле WLTP, что отмечено пунктирной линией зеленого цвета на графиках рис. 2. Значение удельного расхода топлива в цикле WLTP принимается за единицу. Для установления значения удельного расхода топлива на других скоростях движения ТС применяется понижающий или повышающий коэффициент, в соответствии с данными, приведенными на

графиках. Оценка удельных выбросов ПГ транспортным потоком проводится по формуле:

$$E_{\text{п}} = \sum_a (AD_a \times EF_a), \text{ кг/км} \quad (7)$$

где a – вид топлива (бензин, дизтопливо, природный газ, сжиженный нефтяной газ и т.д.); AD_a – удельный расход топлива, л/км; EF_a – коэффициент выбросов CO_2 , CH_4 , N_2O для топлива или другого энергоресурса вида a , кг/л.

При оценке выбросов ПГ необходимо определять выбросы не только CO_2 , но и выбросы CH_4 и N_2O . Коэффициенты приведения: $\text{CO}_{2\text{-экв}} = \text{CO}_2: \text{CH}_4: \text{N}_2\text{O} = 1: 25: 298$ (ГЭФ, РКИК ООН).

Энергопотребление транспортного потока на всей длине участка УДС за год можно оценить по формуле:

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{ТП}} \times L \times K_M, \text{ МДж/год} \quad (8)$$

где $Q_{\text{ТП}}$ – энергопотребление транспортного потока МДж/км*час; L – длина участка УДС, км; K_M – коэффициент перевода интенсивности из часовой/суточной в годовую. По аналогичной формуле можно произвести пересчет парниковых газов из $\text{кгCO}_{2\text{-экв}}/\text{км}$ в $\text{кгCO}_{2\text{-экв}}/\text{год}$.

Величину удельного расхода электроэнергии без учета потерь по типам (моделям) подвижного состава трамваев (троллейбусов) рассчитывают по формуле:

$$H_{\text{пi}} = (H_{\text{т}} + H_{\text{в}}) \times G_{\text{ср}}, \text{ кВт*ч/км} \quad (9)$$

где $H_{\text{т}}$ – технологическая норма расхода электроэнергии на электротягу трамвайного вагона или троллейбуса; $H_{\text{в}}$ – технологическая норма расхода электроэнергии на вспомогательные нужды вагонов (троллейбусов) – собственные нужды, отопление, вентиляция, освещение и т.д.; $G_{\text{ср}}$ – средняя масса трамвая (троллейбуса) с пассажирами.

Косвенные выбросы от использования ТС с тяговым электроприводом рассчитываются через пробег различных типов электрических транспортных средств по методике МАДИ по формуле:

$$E_{\text{к}} = \sum_i (ED_i \times B_{\text{эз}}), \text{ г/км} \quad (10)$$

где i – тип автомобиля (легковой, грузовой, автобус); ED_i – удельный

расход электроэнергии i -ым типом электромобиля, кВт*ч/км; $B_{ээ}$ – коэффициент выбросов CO_2 при производстве энергии, г/кВт*ч.

В формуле 9 могут быть учтены КПД зарядки электромобиля и потери электроэнергии при передаче от источника до тягового аккумулятора. Рассмотрение жизненного цикла электромобиля достаточно объемная задача, требующая отдельного, более детального исследования, которое выходит за рамки данной диссертации.

Для перехода от прямых выбросов (кг $\text{CO}_{2-экв}$ /км*час) i -ой группы ТС к удельным (на единицу транспортной работы) выбросам (кг $\text{CO}_{2-экв}$ /пасс*км и кг $\text{CO}_{2-экв}$ /т*км) необходимо воспользоваться формулой:

$$E_{уд} = \frac{\sum E_{п}}{\sum A_{час}}, \text{ гСО}_{2-экв}/\text{пасс*км} \text{ или } \text{ гСО}_{2-экв}/\text{т*км} \quad (11)$$

где $E_{п}$ – прямые удельные (на километр пробега) i -ой категории ТС, г $\text{CO}_{2-экв}$ /км*час; $A_{час}$ – значение часовой транспортной работы выбранной категории ТС, рассчитывается по формуле:

$$A_{час} = N_{час} \times L \times p, \text{ пасс*км} \text{ или } \text{ т*км} \quad (12)$$

где $N_{час}$ – интенсивность выбранной категории ТС в транспортном потоке, авт/час; L – длина участка, км; p – коэффициент загрузки транспортного средства (число находящихся в ТС пассажиров или масса перевозимого груза).

Упрощенный (инженерный) вариант методики. Для решения практических задач на уровне дорожной или улично-дорожной сети города или региона в данной методике сформированы матрицы расчетных значений удельного расхода топлива транспортного потока для типичного состава потока по виду топлива, интенсивности движения на одну полосу и средней скорости движения.

Фрагмент матрицы значений удельного расхода топлива (л/км) легковых ТС на бензине и дизельном топливе, легких коммерческих автомобилей, грузовых автомобилей и автобусов, находящихся в транспортном потоке, при изменении удельной (на одну полосу) интенсивности движения и средней скорости транспортного потока приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Фрагмент матрицы значений удельного расхода топлива (л/км*час) ТС на бензине и дизельном топливе, находящихся в транспортном потоке, при изменении удельной (на одну полосу) интенсивности движения и средней скорости транспортного потока: а) легковые; б) грузовые и автобусы

| Доля ТС в составе ТП | | 100% | | | | | ... | 5% | | | | |
|----------------------|-----------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| | | Средняя скорость ТП, км/ч | | | | | | | | | | |
| Инт. ТП | Тип топл. | 10 | 15 | 20 | 25 | ... | 85 | 90 | 95 | 100 | | |
| 200 | Б | 31 | 28 | 26 | 25 | ... | 2 | 2 | 2 | 2 | | |
| | ДТ | 3 | 3 | 3 | 3 | ... | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| 300 | Б | 46 | 42 | 40 | 38 | ... | 2 | 2 | 2 | 2 | | |
| | ДТ | 5 | 4 | 4 | 4 | ... | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| 400 | Б | 61 | 56 | 53 | 50 | ... | 2 | 2 | 2 | 2 | | |
| | ДТ | 6 | 6 | 5 | 5 | ... | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| 500 | Б | 77 | 70 | 66 | 63 | ... | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| | ДТ | 8 | 7 | 7 | 6 | ... | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | | |
| 1900 | Б | 291 | 267 | 251 | 239 | ... | 9 | 10 | 11 | 11 | | |
| | ДТ | 29 | 27 | 25 | 24 | ... | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| 2000 | Б | 308 | 280 | 264 | 252 | ... | 10 | 11 | 11 | 12 | | |
| | ДТ | 31 | 28 | 28 | 24 | ... | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| 2100 | Б | 322 | 295 | 278 | 264 | ... | 10 | 11 | 12 | 13 | | |
| | ДТ | 32 | 30 | 28 | 26 | ... | 1 | 1 | 1 | 2 | | |
| 2200 | Б | 338 | 310 | 290 | 276 | ... | 11 | 12 | 13 | 13 | | |
| | ДТ | 34 | 32 | 30 | 28 | ... | 1 | 1 | 2 | 2 | | |

| Доля ТС в составе ТП | | 100% | | | | | ... | 5% | | | | |
|----------------------|-----------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| | | Средняя скорость ТП, км/ч | | | | | | | | | | |
| Инт. ТП | Тип топл. | 10 | 15 | 20 | 25 | ... | 85 | 90 | 95 | 100 | | |
| 200 | Б | 11 | 10 | 9 | 8 | ... | 1 | 1 | 2 | 2 | | |
| | ДТ | 102 | 90 | 76 | 64 | ... | 9 | 9 | 10 | 10 | | |
| 300 | Б | 14 | 12 | 10 | 8 | ... | 1 | 1 | 2 | 2 | | |
| | ДТ | 154 | 136 | 116 | 98 | ... | 12 | 13 | 14 | 14 | | |
| 400 | Б | 18 | 16 | 14 | 12 | ... | 1 | 1 | 2 | 2 | | |
| | ДТ | 204 | 180 | 154 | 128 | ... | 16 | 16 | 17 | 18 | | |
| 500 | Б | 22 | 20 | 18 | 14 | ... | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| | ДТ | 256 | 224 | 194 | 162 | ... | 21 | 22 | 23 | 24 | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | | |
| 1900 | Б | 84 | 74 | 64 | 54 | ... | 7 | 7 | 8 | 8 | | |
| | ДТ | 968 | 848 | 728 | 608 | ... | 74 | 79 | 83 | 88 | | |
| 2000 | Б | 88 | 78 | 66 | 56 | ... | 7 | 7 | 8 | 8 | | |
| | ДТ | 1022 | 896 | 770 | 644 | ... | 78 | 82 | 87 | 92 | | |
| 2100 | Б | 94 | 82 | 70 | 58 | ... | 8 | 9 | 9 | 10 | | |
| | ДТ | 1074 | 942 | 808 | 676 | ... | 83 | 88 | 93 | 98 | | |
| 2200 | Б | 98 | 86 | 74 | 62 | ... | 8 | 9 | 9 | 10 | | |
| | ДТ | 1124 | 986 | 846 | 708 | ... | 86 | 91 | 97 | 102 | | |

Дальнейшие преобразования данных, полученных с использованием инженерного варианта методики, такие же как для детализированного варианта.

Третья глава посвящена экспериментальной оценке основных показателей транспортного потока в крупном городе. Проведено комплексное натурное обследование характеристик транспортного потока на вылетной автомагистрали г. Москвы – Кутузовском проспекте. Обследование выполнено с соблюдением требований действующих нормативных документов, что обеспечивает достоверность и сопоставимость полученных данных.

Натурное обследование проводилось в мае 2022 года с использованием двух видеокамер, установленных на обеих сторонах автомагистрали, что позволило синхронно фиксировать транспортные потоки встречных направлений и провести последующий анализ с минимальной погрешностью. Объем собранной видеoinформации превысил 210 Гб (свыше 40 часов записи).

Наблюдения охватывали характерные временные интервалы: утренние и вечерние часы пик в будние и выходные дни, а также ночное время. Такая временная разбивка позволила выявить закономерности изменения интенсивности,

состава и скоростных характеристик потока в зависимости от периода суток и дня недели.

Особое внимание в исследовании уделено пассажирскому транспорту. На основе анализа данных Департамента транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры города Москвы, расписаний маршрутов и сведений о подвижном составе ГУП «Мосгортранс» выполнена детальная оценка интенсивности движения городских и пригородных автобусов, а также их пассажироместимости. Для каждого маршрута определено количество автобусов на линии, суточное число рейсов и типы используемых транспортных средств. Установлено, что в структуре автобусного сообщения на рассматриваемом участке преобладают автобусы частных перевозчиков.

Для всех категорий транспортных средств разработаны и эмпирически обоснованы коэффициенты загрузки. В отношении легковых автомобилей, на основе ранее выполненных исследований, принято среднее количество пассажиров на одно транспортное средство в размере 1,45 чел. Для автомобилей-такси, по результатам опроса водителей таксомоторных парков, данный показатель составил 2,3 чел. Микроавтобусы массой до 3,5 т, используемые в личных целях и для коммерческих перевозок, имеют загрузку 4,0 пассажира.

Для автобусов полной массой свыше 3,5 т дифференциация выполнена с учетом режима движения: в будние дни загрузка принята на уровне номинальной (5 чел./м²), в выходные – по числу сидячих мест. В формализованном виде для расчетов принято, что автобусы категории М2 в среднем перевозят 20 пассажиров, а категории М3 – 50 пассажиров.

Грузовые транспортные средства классифицированы по категориям N1, N2 и N3, для которых установлены средние значения перевозимого груза за одну поездку: 2,0 т, 7,75 т и 12,0 т соответственно. Полученные коэффициенты учтены в дальнейших расчетах с разделением легковых автомобилей на личные и такси категорий «Medium» и «Large» с соответствующими долями 0,835 и 0,165.

Результаты экспериментального исследования позволили сформировать верифицированный набор исходных данных, включающий показатели

интенсивности, состава потока, средней скорости движения, коэффициенты загрузки пассажирских и грузовых ТС.

Разработанный подход и полученные количественные характеристики были распространены на улично-дорожную сеть города Москвы с учетом ее функционального зонирования, что создает основу для практического применения методики оценки энергопотребления и выбросов парниковых газов на единицу транспортной работы. Это имеет особое значение для целей верификации инфраструктурных проектов на соответствие критериям «зеленого» финансирования.

Четвертая глава посвящена оценке влияния разных мероприятий на показатели энергопотребления и выбросов ПГ городской транспортной системой при разных сценариях ее развития (таблица 7).

Таблица 7 – Сценарии развития транспортной инфраструктуры

| Год | Доля электромобилей от общего количества ТС, % | Разница с базовым вариантом | Доля ПТОП от общего количества ТС, % | Разница с базовым вариантом, % |
|---|--|-----------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|
| Базовый вариант | | | | |
| 2024 | 0,69 | | 1,1 | |
| Сценарий «Электрификация автомобильного транспорта» | | | | |
| 2028 | 3,9 | +3,21 | 1,23 | +0,12 |
| 2029 | 5,2 | +4,51 | 1,27 | +0,16 |
| 2030 | 7 | +6,31 | 1,3 | +0,19 |
| Сценарий «Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)» | | | | |
| 2028 | 0,8 | +0,11 | 2 | +0,9 |
| 2029 | 0,8 | +0,11 | 3,5 | +2,4 |
| 2030 | 0,8 | +0,11 | 5 | +3,9 |

Использование геоинформационных систем позволило не только получить количественные оценки, но и визуализировать пространственное распределение выбросов парниковых газов (ПГ) транспортными потоками по территории города (рисунок 3, таблица 8).

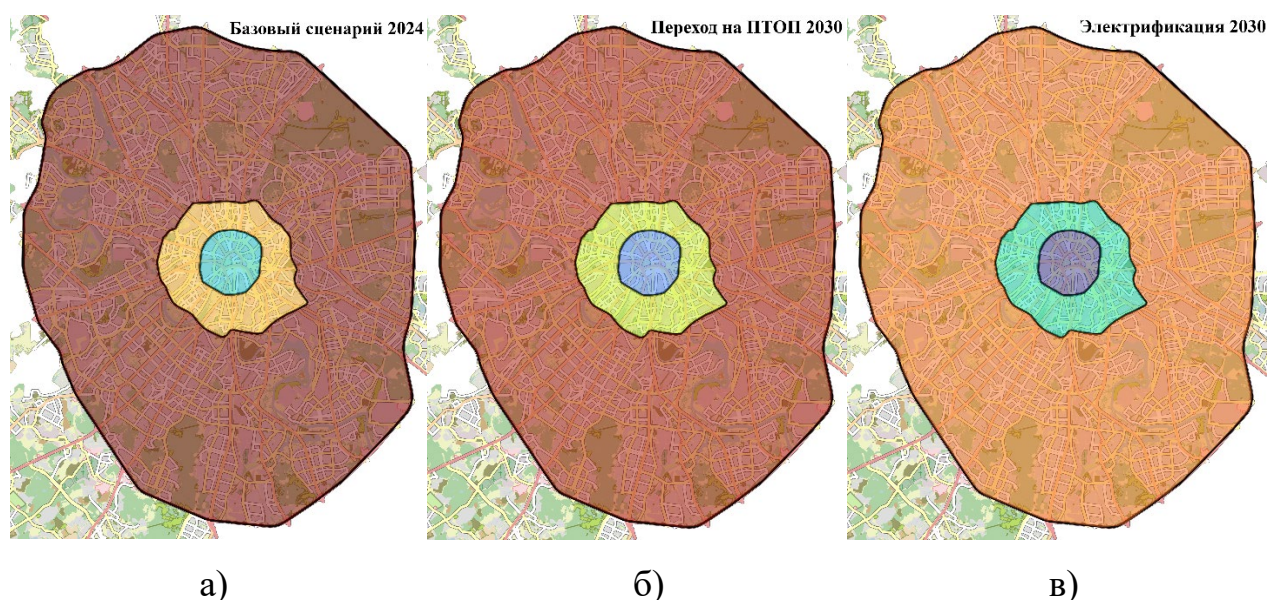


Рисунок 3 – Картограмма выбросов парниковых газов (тCO_{2-экв}/год) с привязкой к улично-дорожной сети на территории города Москвы (а – базовый сценарий 2024 год, б – расчетный сценарий перехода на пассажирский транспорт общего пользования 2030 год, в – расчетный сценарий электрификации 2030 год).

Таблица 8 – Кластеризация выбросов парниковых газов (тCO_{2-экв}/год).

| № кластера | Значение выбросов ПГ, тCO _{2-экв} /год | Цвет | № кластера | Значение выбросов ПГ, тCO _{2-экв} /год | Цвет |
|------------|---|--------------|------------|---|--------------|
| 1 | 0 – 200 000 | Dark Purple | 11 | 1 150 000 – 1 118 000 | Light Green |
| 2 | 240 000 – 250 000 | Dark Blue | 12 | 1 118 000 – 1 121 000 | Yellow |
| 3 | 250 000 – 260 000 | Blue | 13 | 1 121 000 – 1 124 000 | Orange |
| 4 | 260 000 – 270 000 | Light Blue | 14 | 1 124 000 – 1 127 000 | Light Orange |
| 5 | 270 000 – 280 000 | Cyan | 15 | 1 127 000 – 7 250 000 | Orange |
| 6 | 280 000 – 290 000 | Teal | 16 | 7 250 000 – 7 500 000 | Dark Orange |
| 7 | 1 030 000 – 1 060 000 | Green | 17 | 7 500 000 – 7 750 000 | Red-Orange |
| 8 | 1 060 000 – 1 090 000 | Light Green | 18 | 7 750 000 – 8 000 000 | Red |
| 9 | 1 090 000 – 1 120 000 | Yellow-Green | 19 | 8 000 000 – 8 250 000 | Dark Red |
| 10 | 1 120 000 – 1 150 000 | Yellow | | | |

При реализации сценария «Электрификация автомобильного транспорта» в 2030 году можно обеспечить значительное снижение прямых валовых выбросов ПГ транспортными потоками на сети на 12% по сравнению с базовым 2024 годом. Однако при этом возможен существенный рост косвенных валовых выбросов ПГ (на 613%), связанных с производством электроэнергии на электротягу легковых, грузовых электромобилей и электробусов. Удельные выбросы прямых и косвенных выбросов ПГ транспортными потоками на УДС на единицу пассажирской транспортной работы могут снизиться на 16%.

Реализация сценария «Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)» обеспечит более скромное снижение прямых валовых выбросов ПГ транспортными потоками (на 4%), но может привести к существенному повышению энерго-экологической эффективности городского наземного транспорта в части снижения удельных выбросов ПГ транспортными потоками на УДС на единицу пассажирской транспортной работы (на 52%) вследствие роста пассажиропотока на транспорте общего пользования.

Результаты расчетов энергопотребления и выбросов ПГ транспортными потоками в городе Москве по приведенным сценариям с использованием разработанной методики приведены на рисунках 4 и 5.

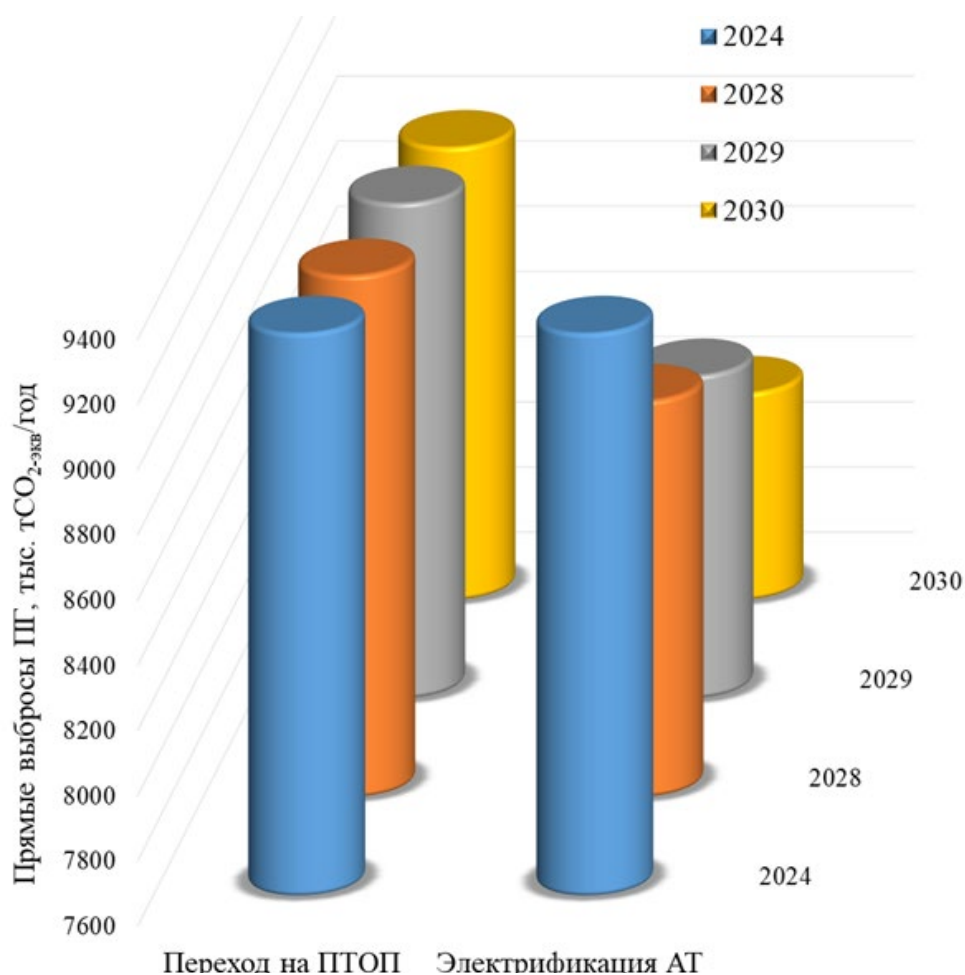


Рисунок 4 – Результаты расчетов прямых выбросов ПГ транспортными потоками по приведенным сценариям

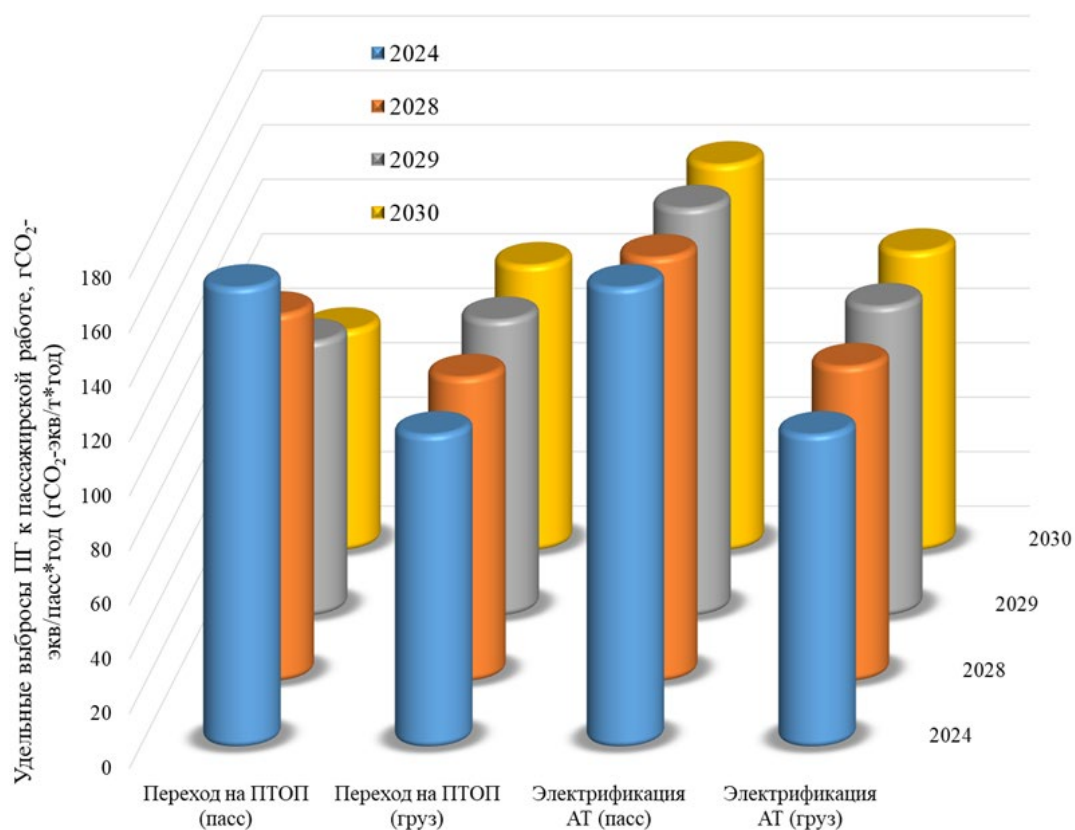


Рисунок 5 – Результаты расчетов удельных выбросов (на единицу транспортной работы) ПГ транспортными потоками по приведенным сценариям

Таким образом, с точки зрения минимизации воздействия наземного транспорта на окружающую среду в пределах территории МКАД (прямые валовые выбросы ПГ транспортными потоками) более эффективен сценарий «Электрификация автомобильного транспорта». С точки зрения энерго-экологической эффективности наземного транспорта по удельным выбросам ПГ транспортными потоками на единицу пассажирской транспортной работы более предпочтителен сценарий «Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)».

Валидация результатов расчетной оценки выбросов ПГ транспортными потоками на УДС с использованием разработанной методики в сравнении с результатами расчетов по методике COPERT 5 показала высокую степень соответствия (таблица 9): средняя относительная ошибка составила 6,21%, коэффициент корреляции – 0,99992, что подтверждает достоверность и адекватность разработанной в диссертации методики.

Таблица 9 – Результаты сравнения значений выбросов ПГ транспортными потоком при использовании авторской методики и методики COPERT 5

| Сценарий | Год | Авторская методика | Методика COPERT 5 | Средняя абсолютная ошибка, тСО _{2-экв} /Год | Относительная ошибка, % |
|--|------|---|---|--|-------------------------|
| | | Выбросы ПГ транспортным потоком, тыс. тСО _{2-экв} /Год | Выбросы ПГ транспортным потоком, тыс. тСО _{2-экв} /Год | | |
| Базовый | 2024 | 9 328 | 10 020 | 692 317 | 6,91 |
| Электрификация автомобильного транспорта | 2028 | 8 817 | 9 393 | 575 983 | 6,13 |
| | 2029 | 8 592 | 9 107 | 514 217 | 5,65 |
| | 2030 | 8 237 | 8 677 | 440 446 | 5,07 |
| Переход на пассажирский транспорт общего пользования | 2028 | 9 202 | 9 854 | 651 408 | 6,61 |
| | 2029 | 9 122 | 9 756 | 634 226 | 6,47 |
| | 2030 | 8 992 | 9 609 | 617 121 | 6,42 |

Величину косвенных валовых выбросов ПГ наземными транспортными средствами при их электрификации можно снизить за счет декарбонизации процессов получения электроэнергии (переход на возобновляемые источники энергии, модернизация ТЭЦ). Но прямые валовые выбросы ПГ миллионами одиночных автомобилей в транспортных потоках можно уменьшить только путем перехода наземного транспорта на электротягу. Вместе с тем, необходимо отметить, что одновременная реализация обоих сценариев даст максимальный энерго-экологический эффект на уровне городской транспортной системы.

Таким образом, разработана комплексная методика оценки энерго-экологической эффективности транспортных потоков на улично-дорожной сети крупного города, позволяющая получить результаты с приемлемой точностью при существенном упрощении и удешевлении сбора исходных данных в сравнении с другими известными методиками и методами.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Современные инструменты математического и имитационного моделирования, а также интеграции ГИС-технологий и теории графов целесообразно использовать для создания комплексной пространственно-временной методики оценки энерго-экологической эффективности транспортных потоков на УДС крупного города с транспортными потоками, состоящими из транспортных средств с разными типами энергоустановок (по виду топлива, энергии).

2. В диссертации разработана авторская структура состава транспортных потоков по 14 категориям транспортных средств (ТС), адаптированная под общедоступные данные государственных статистических наблюдений. За основу принята классификация методики COPERT, которая дополнена легковыми и грузовыми электромобилями и электробусами.

3. Разработана комплексная методика оценки энергопотребления и выбросов ПГ транспортными потоками на УДС крупного города, состоящими из ТС с разными типами энергоустановок, позволяющая рассчитывать удельные и валовые показатели. Ее особенность в использовании «эталонных» марок ТС для каждой категории ТС в транспортных потоках на УДС и системы поправочных коэффициентов ($k_1 - k_3$), полученных на основе фазового анализа цикла WLTP, для учета реальных условий эксплуатации (интенсивности движения, состава потока, скорости движения). Для пассажирских и грузовых ТС полной массой до 3,5 т введен комплексный показатель (К), учитывающий снаряженную массу, рабочий объем двигателя и фактор обтекаемости ТС. Для ТС полной массой более 3,5 т используются значения удельных (пробеговых) выбросов и расхода топлива из международной базы данных MARLIS.

4. Результаты натурного обследования транспортных потоков (ТП) на Кутузовском проспекте (Москва) позволили установить характеристики ТП, необходимые для расчетных оценок энергопотребления и выбросов ПГ по разработанной методике и средние коэффициенты загрузки пассажирских транспортных средств рассматриваемых типов в транспортном потоке.

5. Сценарный прогноз выбросов ПГ транспортными потоками на УДС крупного города до 2030 года, выполненный по разработанной методике, показал, что реализация сценария «Электрификация» (7% электромобилей к 2030 г.) может привести к снижению прямых выбросов ПГ наземным транспортом на 12%. При реализации сценария «Развитие ПТОП» можно снизить удельные выбросы ПГ на единицу пассажирской транспортной работы на 52%. Валидация результатов расчетов методики путем сравнения с результатами модели COPERT 5 показала высокую степень согласованности.

6. Разработанная методика адаптирована для решения прикладных задач, включая подтверждение критериев «зеленого финансирования», предполагающие оценку выбросов ПГ транспортными потоками на единицу пассажирской или грузовой транспортной работы.

IV. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК РФ

1. Оценка выбросов загрязняющих веществ транспортными потоками на отдельных территориях Москвы / Ю. В. Трофименко, В. И. Комков, Б. А. Кутырин, Д. А. Деянов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2020. – № 2(61). – С. 84-91. (объем 8 страниц, авторский вклад 75%)

2. Деянов, Д. А. Методика оценки энергопотребления и выбросов парниковых газов транспортным потоком на улично-дорожной сети / Д. А. Деянов, Ю. В. Трофименко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2024. – № 3(78). – С. 68-77. (объем 10 страниц, авторский вклад 90%)

Публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов Scopus и Web of Science

3. Shelmakov, S. V. Engineering methodology for determining the electric power consumption for traction by an electric vehicle in different operating conditions / S. V. Shelmakov, Y. V. Trofimenko, D. A. Deianov // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings, Moscow, 15–17 марта 2022 года. – Moscow, 2022. – DOI 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744383. (объем 8 страниц, авторский вклад 75%)

4. Trofimenko, Yu.V. Methodology for predictive estimation of specific greenhouse gas emissions by traffic flows/ Yu. V. Trofimenko, S.V. Shelmakov, D. A. Deianov // 2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED) - Conference Proceedings, Moscow, 10–11 ноября 2022

года. – Moscow, 2022. – DOI 10.1109/TIRVED56496.2022.9965512 (объем 5 страниц, авторский вклад 70%)

Публикации в других изданиях

5. Трофименко, Ю. В. Расчетная оценка энергопотребления автотранспортного средства с гибридной энергоустановкой / Ю. В. Трофименко, С. В. Шелмаков, Д. А. Деянов // Проектирование автомобильных дорог : Сборник докладов 80-й Международной научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 24–28 января 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "А-проджект", 2022. – С. 280-292. (объем 13 страниц, авторский вклад 80,7%)

6. Трофименко, Ю. В. Инженерная методика оценки расхода топлива (энергии) автотранспортными средствами / Ю. В. Трофименко, Д. А. Деянов // Автотракторостроение и автомобильный транспорт : Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Минск, 24 мая – 10 2022 года. Том 1. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2022. – С. 42-46. (объем 5 страниц, авторский вклад 80%)

7. Деянов, Д. А. Оценка экологической эффективности ограничения въезда автомобилей низких экологических классов на отдельные территории Москвы / Д. А. Деянов, Ю. В. Трофименко // Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов ELPIT 2021 : Сборник трудов восьмого международного экологического конгресса (десятой международной научно-технической конференции), Самара-Тольятти, 22–26 сентября 2021 года. Том 3. – Самара: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 2021. – С. 41-46. (объем 5 страниц, авторский вклад 83%)

8. Кутырин, Б. А. Оценка распределения выбросов дисперсных частиц транспортными потоками по территории города с использованием ГИС-технологии / Б. А. Кутырин, Д. А. Деянов // Тенденции развития науки и образования. – 2020. – № 62-5. – С. 58-61. – DOI 10.18411/lj-06-2020-99. (объем 4 страницы, авторский вклад 70%)

9. Актуализация оценок выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта в Национальном кадастре за 2010-2021 гг / В. М. Лытов, Ю. В. Трофименко, В. А. Гинзбург [и др.] // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – 2024. – Т. 35, № 1-2. – С. 101-123. – DOI 10.21513/0207-2564-2024-1-2-101-123. (объем 23 страницы, авторский вклад 60,9%)

Свидетельства о регистрации программы ЭВМ:

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663884 Российская Федерация. AutoDynaMo: № 2024663156: заявл. 13.06.2024: опубл. 13.06.2024 / С. В. Шелмаков, Ю. В. Трофименко, Д. А. Деянов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024663883 Российская Федерация. Расчет базового расхода топлива (РБРТ) : № 2024663155: заявл. 13.06.2024: опубл. 13.06.2024 / Ю. В. Трофименко, С. В. Шелмаков, Д. А. Деянов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет».

Подписано в печать: 01.04.2026. Формат 60x84/16
Печать офсетная. Усл. печ.л. 1,2. Тираж: 100 экз.
МАДИ, 125319, Москва, Ленинградский проспект, 64