

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»

На правах рукописи

Деянов Денис Александрович

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Трофименко Ю. В.

Москва – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	11
1.1 Методики оценки расхода топлива, энергии, энергопотребления и выбросов парниковых газов одиночных транспортных средств с разными типами энергоустановок	11
1.1.1 Ездовые циклы, имитирующие реальные условия эксплуатации АТС .	12
1.1.2 Методы оценки путевого расхода топлива	13
1.2 Методики оценки расхода топлива, энергии, энергопотребления и выбросов парниковых газов транспортными потоками.....	22
1.3 Методики оценки расхода топлива, энергии, энергопотребления и выбросов парниковых газов транспортными сетями городов, регионов.....	36
1.4 Мероприятия по снижению энергопотребления одиночных транспортных средств и транспортных потоков	44
1.5 Цель и задачи диссертационного исследования.....	48
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ КРУПНОГО ГОРОДА.....	52
2.1 Оценка расхода топлива, энергии, энергопотребления и выбросов парниковых газов единичными колесными транспортными средствами.....	52
2.1.1 Методика оценки энергопотребления одиночных колесных транспортных средств.....	52
2.1.2 Расширенная версия методики оценки энергопотребления одиночных колесных транспортных средств с тяговым электродвигателем	58
2.2 Авторская структура транспортного потока по типу АТС.....	62
2.3 Оценка энергопотребления транспортным потоком.....	67
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА В КРУПНОМ ГОРОДЕ	81
ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ТРАНСПОРТНЫМ ПОТОКОМ.....	89
4.1 Сценарный прогноз прямых и косвенных выбросов ПГ на транспортной сети города Москвы	89
4.2 Верификация и валидация методики расчетной оценки выбросов ПГ транспортными потоками на сети	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	108
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	113

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ЕЗДОВЫЕ ЦИКЛЫ ОДИНОЧНЫХ ТС, ИМИТИРУЮЩИЕ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ	126
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТС ПО СЦЕНАРИЯМ.....	136
ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.	141

ВВЕДЕНИЕ

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 населения. При этом влияние транспортных систем на природную и социальную среду является неоднозначным, т.е. может быть как позитивным, так и негативным. В числе негативных факторов основными являются загрязнение окружающей среды, истощение природных ресурсов, эстетическая деградация (изменение природного и техногенного ландшафта, занятие земель транспортной инфраструктурой, повреждение зданий и памятников вибрацией и промышленными газами, а также видимый вред, вызванный накоплением твердых и жидких отходов), локальное изменение климата, транспортная дискриминация людей с ограниченной подвижностью, риски ЧС природного, техногенного, социального характера.

В последние годы транспортные системы крупных городов кардинально меняются. 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 энерго-экологической эффективности транспортных систем.

Между тем, 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 загрязняющих 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 отдельных 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 высокую точность и быть доступны. Данные обстоятельства предопределили выбор темы, постановку цели и задач диссертационного исследования.

Гипотеза исследования. Для оценки энерго-экологической эффективности транспортных потоков на улично-дорожной сети крупного города может быть разработана достоверная методика оценки энергопотребления, прямых и косвенных выбросов ПГ городскими транспортными потоками на улично-дорожной сети, состоящими из отдельных транспортных средств с разными типами энергоустановок (по виду топлива, энергии).

Степень разработанности темы исследования. Вопросам 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.

Среди зарубежных исследователей в этом направлении успешно работали: Mitschke M., Matsumoto K., Ulrich K., Wallentowitz H., Helmers E., Butler T., Dauwels J., Moro A., Pehnt M., Elsland R., Lutz C. и других.

Целью настоящего исследования является 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 единичных транспортных средств, транспортных потоков, транспортных систем, выявить их системные недостатки и обосновать необходимость применения современных инструментов математического и имитационного моделирования.

- Проанализировать существующие и разработать авторскую структуру транспортного потока по типам автотранспортных средств (АТС) и видам используемого топлива (энергии), оценить влияние детализации этой структуры на точность расчета энергопотребления транспортным потоком.

- Разработать комплексную методику оценки энергопотребления и выбросов ПГ городской транспортной системой, учитывающую 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), горэлектротранспорта (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:

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 АТС 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 АТС 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 K , который включает в

себя снаряженную массу транспортного средства, рабочий объем цилиндра (для двигателей с ДВС) и фактор обтекаемости;

- коэффициента аэродинамического сопротивления конструкций АТС 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.

Практическая значимость результатов исследования. Результаты работы могут быть реализованы в виде методик и компьютерных программ, которые позволяют оценить энергопотребление и выбросы ПГ транспортным потоком в крупном городе, выявить влияние различных схем организации дорожного движения на энергопотребление и выбросы ПГ наземным городским транспортом. Это позволит учитывать показатель энергопотребления при проектировании новых участков улично-дорожной сети, оценивать эффективность введения тех или иных мероприятий по организации дорожного движения.

Реализация результатов диссертационной работы. Результаты исследования используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет». Они внедрены в ОАО НИИАТ, а также включены в Распоряжение Минтранса России от 14.03.2008 N AM-23-р (ред. от 30.09.2021) "О введении в действие методических рекомендаций "Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте".

По разработанным методикам получены свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

- № 2024663883, Расчет базового расхода топлива (РБРТ);
- № 2024663884, AutoDynaMo.

Основные 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 АТС 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.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Основные результаты исследования были доложены, обсуждены и одобрены на 79, 80, 81, 82, 84 научно-методических и научно-исследовательских конференциях МАДИ (Москва, 2021 – 2026 годы), международной научно-технической конференции «Автомобиле - и тракторостроение» (Минск, БНТУ, 2022 год), 9-ой 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 печатных изданий, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в перечень рецензируемых изданий, утвержденных ВАК Минобрнауки России, 2 статьи в издании, индексируемом в международной базе Scopus, 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, списка литературы 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.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Методики оценки расхода топлива, энергии, энергопотребления и выбросов парниковых газов одиночных транспортных средств с разными типами энергоустановок

Для оценки базовых и эксплуатационных норм расхода топлива (энергии) колесных транспортных средств в Российской Федерации используется нормативный документ – Распоряжение Минтранса Российской Федерации от 14.03.2008 № АМ-23-р.

В рассматриваемом нормативном документе для расчетной оценки базовых и эксплуатационных норм расхода моторного топлива и ГСМ различных марок всех типов АТС использован методический подход, основанный на решении уравнения тягового баланса при движении АТС по типизированным ездовым циклам (оценка базового расхода топлива) [73]. Затем полученное расчетным путем или приведенное в табличной форме значение базового расхода дополняется корректирующими коэффициентами, учитывающими реальные условия эксплуатации, и определяется норматив расхода в эксплуатации по формуле:

$$Q_n = 0,01 \times H_s \times S \times (1 + 0,01 \times D), \quad (1.1)$$

где Q_n - нормативный расход топлив (энергии), л; H_s - базовая норма расхода топлив (энергии) на пробег автомобиля, л/100 км; S - пробег автомобиля, км; D - поправочный коэффициент (суммарная относительная надбавка или снижение) к норме, %.

Однако широкое использование данной методики сдерживается следующим обстоятельством. На период действия данного документа для моделей, марок и модификаций автомобильной техники, поступающей в автопарк страны, на которую Минтрансом России не утверждены нормы расхода топлив (отсутствующие в данном документе), по решению юридического лица или индивидуального предпринимателя, осуществляющего эксплуатацию АТС, в отношении данных АТС могут вводиться базовые нормы, разработанные по

индивидуальным заявкам в установленном порядке научными организациями, осуществляющими разработку таких норм по специальной программе-методике [49]. При этом содержание этой специальной программы-методики не приводится; она не утверждена нормативным документом и не предназначена для публичного использования. Невозможность оценить достоверность приведенных в методических указаниях оценок базовых норм расхода топлива (энергии) автомобилей конкретных марок и соответственно эксплуатационных норм расхода, а также отсутствие в этой методике механизма оценки выбросов ПГ является поводом для их совершенствования.

В данной методике базовые нормы расхода топлив и смазочных материалов АТС с ДВС, полученные на основе данных заводов-изготовителей о результатах сертификации транспортных средств при их движении по типизированным ездовым циклам на стендах и дорожных испытаний, или полученные расчетным путем с использованием имитационных моделей движения одиночных ТС по этим ездовым циклам. Однако для пользователей используемый ездовой цикл остается неизвестным, а установленные надбавки вносят дополнительную неопределенность.

Выполненный анализ информации по данному вопросу в публичном пространстве показал, что за рубежом (в странах Европейского Союза, Германии, США, Канады, Японии, Великобритании, КВТ ЕЭК ООН) нормы расхода топлива (энергии) (базовые и в эксплуатации) одиночных колесных транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания, использующими жидкие нефтяные, газомоторные и другие виды топлива, не устанавливаются.

1.1.1 Ездовые циклы, имитирующие реальные условия эксплуатации АТС

В России основными нормативными документами в этой части являются ГОСТ Р 54810-2011 Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний и ГОСТ Р 41.84-99 (Правила ЕЭК ООН № 84) «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения дорожных транспортных

средств, оборудованных двигателем внутреннего сгорания, в отношении измерения потребления топлива» подразумевают определение расхода топлива при выполнении ездовых циклов, которые представляют собой набор ускорений, движения с постоянной скоростью и замедлений, выполняемых в определенной последовательности и разной продолжительности, которые не меняются уже более 10 лет [65].

Между тем за рубежом для оценки выбросов загрязняющих веществ и расхода топлива ТС полной массой до 3,5 т ездовые циклы постоянно совершенствуются.

Сведения о расходе моторного топлива для одиночных колесных транспортных средств (КТС) конкретных моделей формируются в результате проведения стандартизированных испытательных процедур – нормативно установленных ездовых циклах (NEDC, WLTP, EPA (FTP 75), отличающиеся нагрузочными и скоростными режимами имитации движения в реальных условиях на стендах с беговыми барабанами. Эти испытания проводятся в обязательном порядке фирмами-изготовителями транспортных средств при их сертификации (Приложение А) [33, 4, 16]. Источниками этих данных для потребителей транспортных услуг выступают как заводы-изготовители, так и независимые испытательные лаборатории, а также профильные издания.

1.1.2 Методы оценки путевого расхода топлива

Для вычисления расхода топлива, как правило, используется результат замера пробега транспортного средства; затем, исходя из нормы расхода топлива на 100 километров пробега, рассчитывается фактический расход топлива данным транспортным средством. Норматив расхода топлива ТС устанавливается нормативными документами, как правило, зачастую не совпадают с реальными значениями.

В частности, фактический расход отличается от нормативного приблизительно на 10% (легковые ТС) и на 70-80% (грузовые ТС) [27,65].

Вместе с тем, существуют методики, которые позволяют вычислять нормативный расход достаточно точно. Однако, такие методики требуют значительный набор исходных данных и параметров, собрать и учитывать которые порой не представляется возможным. Поэтому достоверность расчета расхода топлива ТС достаточно низка. В связи с этим возникает необходимость в проведении натурных испытаний и замеров, которые заключаются в фактическом контроле расхода топлива ТС.

Наиболее простым и распространенным, однако, и наименее достоверным, является способ определения путевого расхода топлива автомобилем в реальных условиях эксплуатации путем измерения величины пробега (по спидометру), средней скорости движения (данные с бортового компьютера) при израсходовании полного бака топлива, контролируемым по чекам заправки на АЗС (рис. 1.1).

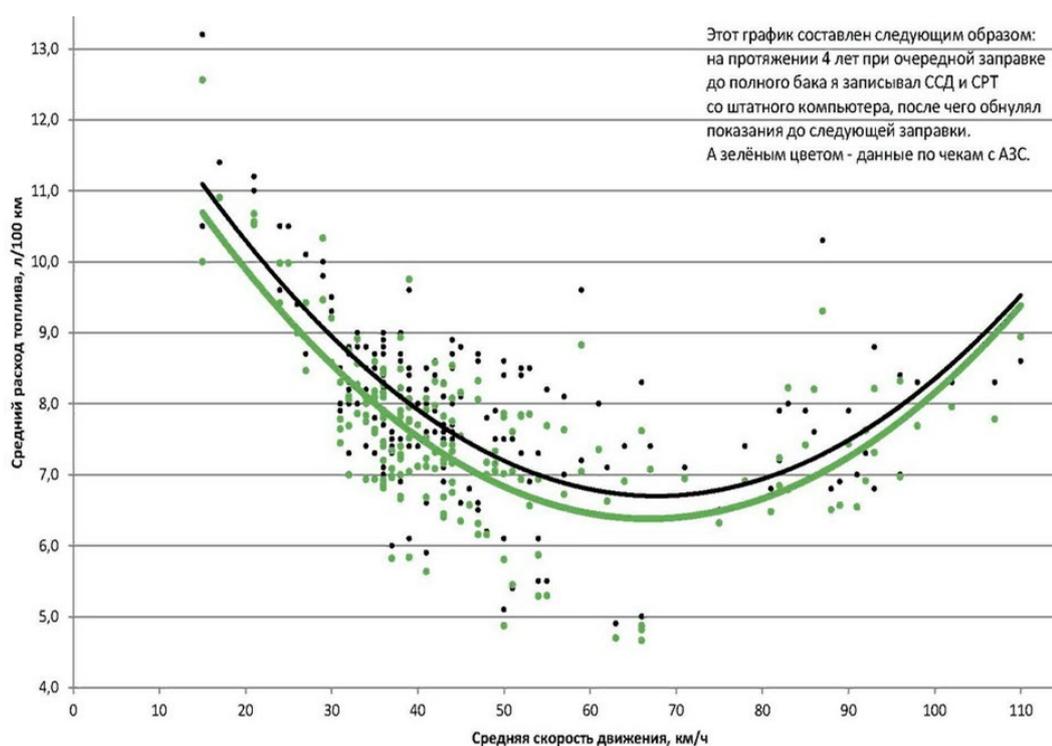


Рисунок 1.1 – Зависимость среднего расхода топлива легковым автомобилем от средней скорости движения, полученная индивидуальным владельцем ТС с использованием спидометра и штатного компьютера на автомобиле

Кроме того, для оценки реального расхода топлива ТС в случае отсутствия топливных расходомеров могут использоваться технологии из области «big data» и

передачи информации о режимах движения, работе отдельных систем автомобиля через Интернет. При этом используется штатное бортовое оборудование автомобиля. Например, электронный блок управления двигателем фиксирует показатели расхода топлива. Нет проблем считать эту информацию и поместить ее в общую базу данных на любом автосервисе или получить ее в реальном режиме времени через сеть Интернет.

Исторически точное измерение расхода горючего на автомобильном транспорте обеспечивалось преимущественно двумя типами приборов: расходомерами проточного типа и датчиками уровня в топливном баке. Конструктивно такие системы включают два ключевых элемента: первичный измерительный преобразователь (сенсор) и бортовой модуль для обработки, хранения и передачи информации. Однако задача организации непрерывного фактического контроля долгое время не находила массового практического применения.

Одной из основных причин являлась техническая сложность реализации вычислительного блока, требующая разработки специализированных процессоров и соответствующего программного обеспечения [65]. Эта же проблема — сложность аппаратной реализации функционального модуля для регистрации и передачи данных — сдерживала широкое внедрение подобных решений.

Использование встраиваемых расходомеров, хотя и предоставляет данные о мгновенном и суммарном расходе, имеет ряд существенных ограничений. К ним относятся: высокая стоимость оборудования, повышенные требования к чистоте топлива, влияние на точность его физико-химических параметров, а также необходимость вмешательства в топливную систему транспортного средства. Средняя погрешность таких устройств обычно находится в диапазоне 1–5%, что в совокупности с перечисленными факторами ограничивает сферу их использования.

Более распространенным и менее инвазивным подходом является метод, основанный на контроле уровня топлива в баке. Он не требует модификации конструкции автомобиля и может работать со штатным оборудованием [27]. Для вычисления расхода применяется подключаемый к бортовой сети контроллер, часто

выполняемый в переносном исполнении. В качестве первичного датчика в подавляющем большинстве случаев используется стандартный поплавковый механизм.

Однако данный метод имеет существенный недостаток, связанный с надежностью датчика. Его точность критически зависит от количества рабочих циклов (замеров): с увеличением наработки происходит механический износ токопроводящей дорожки, что приводит к росту погрешности. Хотя производители часто указывают в документации потенциальную точность на уровне около 0,5%, на практике этот показатель достижим лишь в начале срока службы. При этом в технических условиях, как правило, не регламентируется продолжительность испытательного цикла, необходимая для сохранения заявленной точности, что затрудняет долгосрочную достоверность измерений [27,1].

На рисунке 1.2 приведены результаты контроля расхода топлива на автомобиле с помощью штатного датчика расхода топлива (одометра) (красный цвет) и емкостного датчика уровня топлива в баке Эскорт (синий цвет).



Рисунок 1.2 – Результаты контроля расхода топлива на одном автомобиле с помощью штатного датчика расхода топлива (одометра) (красный цвет) и емкостного датчика уровня топлива в баке (синий цвет) [5]

Датчики контроля уровня топлива, в зависимости от модификации, по цене отличаются не сильно – выбрать надо, опираясь на возможности системы спутникового слежения за транспортом, применяемой на предприятии. Различные виды применяются в зависимости от используемых терминалов спутникового мониторинга ГЛОНАСС. Не у всех терминалов есть RS-485 или частотный вход, но аналоговый есть практически у всех.

Процесс контролирования расхода топлива по CAN-шине (Controller Area Network) является хорошим вариантом при условии невозможности установки более технически сложного и точного оборудования, например, по причине конструктивных особенностей транспортного средства или ограниченного бюджета (рисунок 1.3).

- 1) С помощью бесконтактного CAN-считывателя;
- 2) С помощью Адаптера CAN-LOG

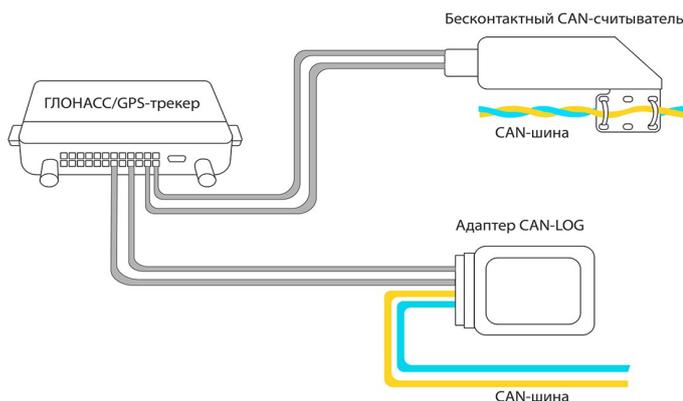


Рисунок 1.3 – Схема подключения GPS-трекера к CAN-шине

Таким образом, в автомобильных парках, включающих в себя в основном легковые транспортные средства эффективнее наладить поступление информации от датчиков расхода топлива, установленных заводом-изготовителем, затем производить сравнение их с данными спутникового мониторинга, чем расходовать значительные денежные средства на более дорогие, конструктивно сложные и не столь доступные в установке технические решения.

На современном этапе развития автомобильной промышленности, практически все автомобили комплектуются диагностическим разъемом формата

OBD II для осуществления самодиагностики. Такой формат, в купе с возросшим техническим интеллектом транспортного средства, позволяет передавать данные о фактическом расходе топлива напрямую на внешний источник, минуя расчетный модуль, что в свою очередь повышает точность полученных результатов и снижает трудозатраты на их получение. Разработанная методика определения расхода топлива автомобиля с помощью данных, получаемых через диагностический разъем с протоколом OBD II, описана в работе [46,44].

В работе [67] была использована расчетная методика оценки расхода топлива с использованием методов имитационного моделирования. Для определения точности моделирования был проведен натурный эксперимент, в ходе которого реальные автомобили испытывались по заданному ездовому циклу. Для определения расхода топлива, затраченного автомобилем на прохождение моделируемого цикла, использовался гравиметрический анализ, согласно Правилами 24 ЕЭК ООН. Массовый расход затраченного топлива определялся на современных электронных весах, погрешность которых составляла 0,1 г. Вместе с показателями расхода топлива, получаемыми с помощью имитационного моделирования и данными экспериментальных заездов, для оценки уровня неопределенности использовалось значение расхода топлива, установленное согласно показаниям бортового компьютера автомобиля, проходившего соответствующий испытательный цикл. Установлено, что расход топлива, полученный при помощи имитационного моделирования, расходится не более чем на 5 % относительно других методов.

Кроме указанных выше способов в некоторых транспортных предприятиях для контроля расхода топлива одиночных КТС в эксплуатации используются топливные расходомеры (датчики расхода топлива – ДРТ), которые устанавливаются непосредственно в топливную магистраль и определяют объемный расход топлива двигателем (рисунок 1.4) [32, 55].



Рисунок 1.4 — Схема встраивания двухпоточного расходомера в топливную систему дизельного ДВС [10]

Информация, регистрируемая расходомерами, транслируется на бортовой контроллер (ГЛОНАСС/GPS-терминал) и далее интегрируется в систему мониторинга. Данная платформа обеспечивает детальную аналитическую обработку данных, включая их фильтрацию и систематизацию [26].

Существуют различные виды расходомеров для двигателей транспортных средств: механические, импульсные, совмещенные, дифференциальные и другие [20]. Однако некоторые датчики не рекомендуется применять для бензиновых двигателей, по причине скоротечного выхода из строя. Для дизельных двигателей напротив можно применять разные датчики, по причине того, что в дизельном топливе содержатся эфирные масла, которые способствуют продолжительной жизни датчика.

Погрешность измерения датчиков варьируется на уровне 1-3%. Однако минусы по-прежнему ощутимы – экономические затраты на датчик, затраты, связанные с обслуживанием и установкой.

Несмотря на перечисленные недостатки, расходомеры часто являются оптимальным вариантом для контроля топлива транспортной техники. Во-первых, форма бака многих машин не всегда приспособлена под установку врезных ДУТов. Во-вторых, качественные расходомеры полезны тем, что передают в программу мониторинга информацию о моточасах и о состоянии топливной системы – то есть

владельцам машин не нужно тратить на установку других датчиков для контроля важных показателей.

Некоторые IT-компании, имеющие опыт интеграции M2M-технологий и ГЛОНАСС/GPS мониторинга транспортных средств, предлагают установку на грузовые автопоезда системы дистанционного мониторинга расхода топлива, предполагающих:

- установку бортовых терминалов ВІ 920 TREK для контроля местоположения, скорости, маршрутов движения, мест и времени стоянок и т.д., подключаемых к бортовому компьютеру;

- подключение терминалов к CAN-шине ТС для считывания штатных показателей (число оборотов ДВС, нагрузка на двигатель, масса груза, уровень жидкости AdBlue и др.);

- монтаж на топливных баках беспроводных емкостных датчиков уровня топлива TD-BLE (Bluetooth Low Energy) для точного контроля объемов заправок и расхода топлива). Подключение таких датчиков не требует прокладки кабелей для установления соединения. Данные передаются по сети Wi-Fi при помощи смарт-устройства (мобильный телефон, планшет, ноутбук), что значительно сокращает время установки и введения системы в эксплуатацию, снижает риск потери данных и некачественного соединения. Благодаря высокой энергоэффективности, приведенные датчики могут работать продолжительное время от незначительного по габаритам источника питания.

Программное обеспечение позволяет диспетчеру транспортного предприятия в реальном режиме времени контролировать данные о расходе топлива, полученные по CAN-шине от штатных датчиков и показаний TD-BLE.

Итак, для мониторинга расхода топлива колесных транспортных средств в реальных условиях эксплуатации на транспортных предприятиях могут осуществляться:

- по показаниям штатного одометра и или расхода топлива по чекам заправки на АЗС;

- с использованием ГЛОНАСС/GPS мониторинга без датчиков расхода топлива;
- с помощью штатного датчика (одометра) через CAN-шину;
- с использованием уровнемеров топлива в топливном баке и топливных расходомеров, встраиваемых в топливную магистраль.

Контроль расхода газа на транспортном средстве с ДВС на газомоторном топливе осуществляется водителем по пройденным километрам и механическому датчику, расположенному сверху, на баллоне ГБО. В последнее время появилось газобаллонное оборудование с электронными датчиками, показания от которых выводятся на различные индикаторы уровня газа в баллоне, либо напрямую в штатные системы ТС. Работают эти датчики крайне нестабильно.

Расчет выбросов парниковых газов от одиночных колесных транспортных средств производят согласно правилам ЕЭК ООН № 101 для категорий M1 и N1, в отечественной литературе это ГОСТ Р 41.101-99 [30].

На основании изложенного, можно сделать вывод, что существуют различные подходы к решению задачи мониторинга расхода топлива на единичных колесных транспортных средствах, отличающиеся степенью точности, сложности реализации и экономической эффективностью. Наиболее распространенные являются методы, основанные на данных штатного одометра и чеков заправки, а также использование ГЛОНАСС/GPS-мониторинга.

Однако указанные методы обладают ограниченной точностью и не обеспечивают полноценного контроля за потреблением топлива. В то же время применение современных технологий, таких как подключение к CAN-шине, использование беспроводных датчиков уровня топлива и расходомеров, позволяет значительно повысить достоверность получаемых данных и обеспечить более точный учет расхода топлива.

Таким образом, выбор метода контроля должен учитывать технические характеристики транспортного средства, ресурсы пользователя и требования к точности мониторинга.

1.2 Методики оценки расхода топлива, энергии, энергопотребления и выбросов парниковых газов транспортными потоками

Существует несколько методик оценки выбросов загрязняющих веществ (ЗВ), в том числе парниковых газов от автомобильного и городского транспорта: GEF TEEMP, ForFITS, VISUM, HBEFA, COPERT 5 и другие. Их описание и особенности приведены в [15, 12].

Почти все методики – многоуровневые, предназначенные для решения разных задач в сфере транспортного планирования и мониторинга ситуации [67]. Они позволяют наиболее достоверно оценить выбросы ЗВ, влияние тех или иных факторов на них.

Более старые методики – одноуровневые. В них использовался единственный подход для определения выбросов. Сравнение методик приведено в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Сравнение отечественных одноуровневых методик

Название методики	Преимущества	Недостатки	Примечание
ИКТП-НИИАТ (1989 г.) [45]	Коэффициенты эмиссии получены экспериментально для АТС полной массой менее 3.5 т.	Коэффициенты эмиссии для АТС полной массой более 3.5 т. получены расчетным путем, на основе испытаний отдельных двигателей	Оценивает погонные выбросы ЗВ на участках дорожной сети (г/км*ч)
Союздорнии (1995 г.) [64]	Учитывает влияние скоростного режима на эмиссию выбросов транспортного потока (г/м*с).	Введенные коэффициенты влияния скорости на выбросы ЗВ не являются гибкими.	
МАДИ (1996 г.)	Также учитывает влияние скорости, но уже для разных категорий отдельно.	Используются упрощенные зависимости для оценки погонных выбросов, основанные на обработке статистики.	

Все приведенные выше методики предусматривают получение окончательного результата путем суммирования выбросов отдельных групп транспортных средств, составляющих транспортный поток.

В более поздних методиках используются два подхода к инвентаризации выбросов ЗВ при эксплуатации автомобильного транспорта в городских условиях.

Первый подход, обычно называют упрощенный, используется при инвентаризации выбросов, когда имеются данные по типам и подтипам автотранспортных средств, а также по потреблению топлива автомобильным парком [67].

Несмотря на то, что первый подход называют упрощенным, он требует достаточно большого объема исходных данных. Весь парк транспортных средств на рассматриваемой территории необходимо разделить на типы, согласно таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Исходные данные для упрощенного подхода к инвентаризации выбросов ПГ и других ЗВ [59].

Тип ТС	Вид топлива	Экологический класс
Легковые автомобили	Бензин	Евро 0-3
	Дизельное топливо	
	СНГ	
	КПГ	
Грузовые автомобили полной массой до 3500 кг	Бензин	Евро 0-3
	Дизельное топливо	
	СНГ	
	КПГ	
Грузовые автомобили полной массой более 3500 кг	Бензин	Евро 0-3
	Дизельное топливо	
	СНГ	
	КПГ	
Автобусы полной массой до 3500 кг	Бензин	Евро 0-3
	Дизельное топливо	
	СНГ	
	КПГ	
Автобусы полной массой свыше 3500 кг	Бензин	Евро 0-3
	Дизельное топливо	
	СНГ	
	КПГ	

Определение структурной сетки парка транспортных средств основывается на анализе представленности различных марок и моделей, зарегистрированных на территории конкретного населенного пункта. Исходными данными для такого анализа служит официальная статистическая форма БДД-1 (ГИБДД).

Оценка потребления топлива в рамках подобных методик может производиться двумя путями:

1. На основе фактических данных, получаемых от организаций и владельцев транспортных средств. Для частных лиц этот подход становится осуществимым только при условии массового оснащения автомобилей датчиками топлива с организацией сбора формируемой ими информации.

2. С применением усредненных (оценочных) величин.

Расчет удельных выбросов парниковых газов (ПГ) и иных загрязняющих веществ (ЗВ) опирается на справочные коэффициенты, которые устанавливают количество выбросов от сжигания единицы массы (1 кг) каждого вида моторного топлива: бензина, дизельного топлива, сжиженного (СНГ) и сжатого (СПГ) природного газа. Эти коэффициенты являются универсальными для всех категорий транспорта.

Упрощенный алгоритм расчета валовых выбросов ЗВ включает следующие шаги:

1. Определение выбросов конкретного вещества от транспорта определенного типа за рассматриваемый период M_i^P , по формуле:

$$M_i^P = g_i^P \cdot V_i^P \cdot 10^{-3}, \text{ т/период} \quad (1.2)$$

где g_i^P – удельный выброс ЗВ от данного типа ТС и вида топлива, г/кг;

V_i^P – объем потребления топлива для данного типа транспортного средства за рассматриваемый период, т/период.

2. Суммирование выбросов для получения общего количества каждого загрязняющего вещества от всего парка транспортных средств M_i ,

$$M_i = \sum_{k=1}^5 M_i^P, \text{ т/период} \quad (1.3)$$

Ключевой проблемой является определение объема топливопотребления. В отсутствие прямой статистики он может быть получен лишь расчетным путем, используя в качестве основы средние годовые пробеги транспортных средств. Такой расчет требует корректировки удельных расходов топлива с учетом реальных условий эксплуатации (средней скорости движения, погодных условий и

прочих факторов). Российская статистика таких данных не дает. Они должны быть определены экспертно или на основе дополнительных измерений [67].

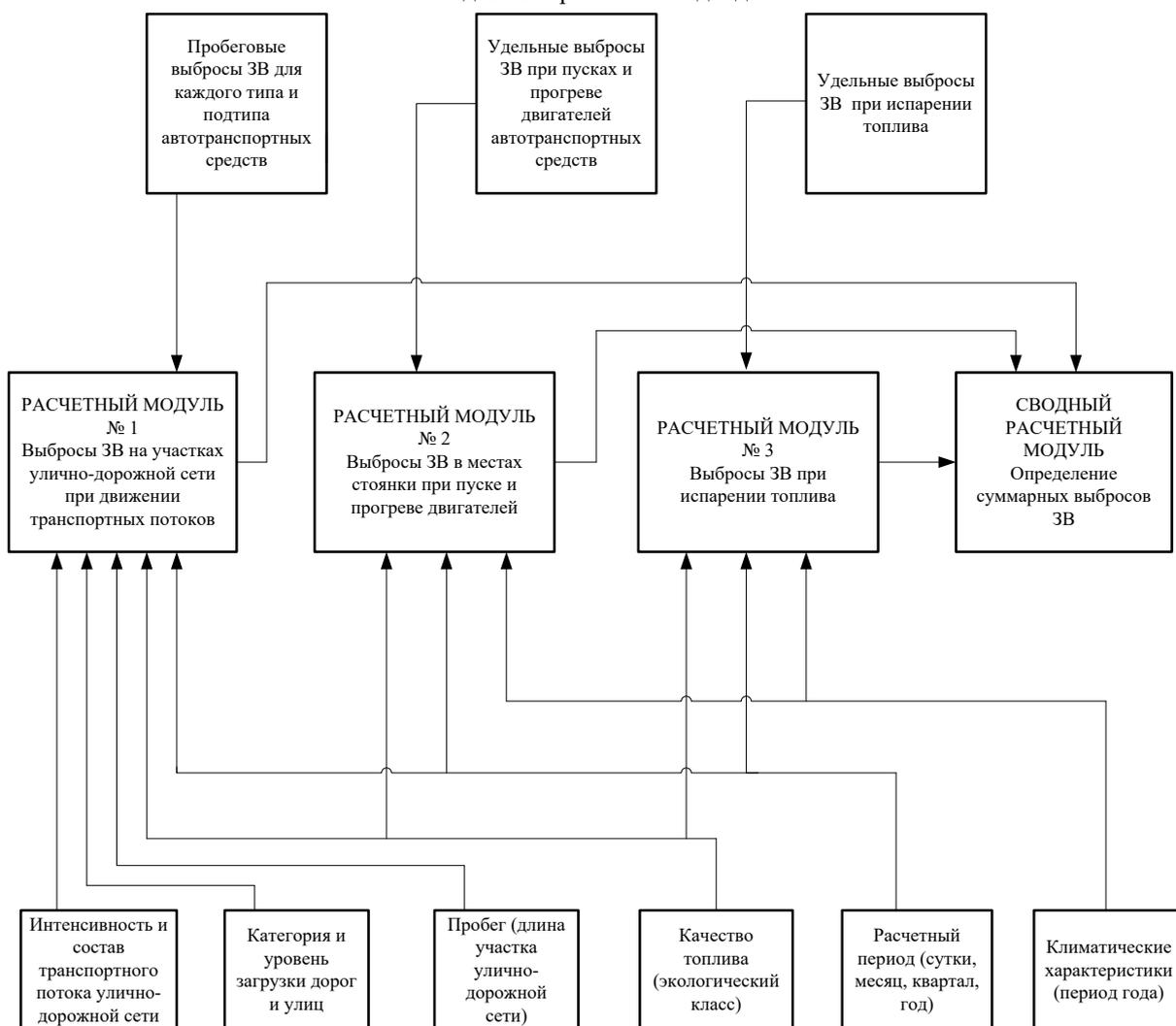
Резюмируя, можно отметить, что в России сбор фактических данных по потреблению топлива автомобильным транспортом крайне затруднен и полученные результаты нельзя считать достаточно надежными [28]. Практическая сложность реализации первого подхода сводится к тому, что потребление топлива требуется оценить не только по видам топлива, но и по каждому типу и подтипу транспортных средств, для чего часто не хватает достоверных данных.

Второй подход – детализированный. Детализированный подход основывается на результатах исследований (или моделирования) характеристик транспортных потоков на УДС населенных пунктов.

Детализированный подход целесообразно использовать при наличии данных о парке автомобилей, интенсивности движения и суммарном пробеге за расчетный период. Укрупненная блок-схема расчетной модели (методики) определения выбросов ПГ и других загрязняющих веществ от АТС при детализированном подходе приведена на рисунке 1.5.

Архитектура расчетной модели для оценки выбросов ЗВ от автотранспорта основана на детализированном подходе. Ее ядро составляют четыре специализированных расчетных модуля, работающих с двумя типами информационных массивов: шестью блоками первичных входных данных и тремя блоками вспомогательных (нормативно-справочных) величин.

Блоки справочных данных по удельным выбросам автотранспортных средств при детализированном подходе



Блоки входных (исходных) данных для проведения расчетов при детализированном подходе

Рисунок 1.5 – Укрупненная блок-схема расчетной модели определения выбросов ПГ и других ЗВ от автомобильного транспорта, основанной на детализированном подходе

Начальный этап применения методики — подготовка исходной информации, которая должна включать, в первую очередь:

1) Агрегированные данные об УДС и условиях движения. Для моделирования улично-дорожная сеть населенного пункта структурируется по категориям дорог и характеристикам транспортного потока, согласно установленной таксономии (табл. 1.3) [47]

Таблица 1.3 – Категории и условия движения в улично-дорожной сети населенных пунктов

I.П	Магистральные дороги регулируемого движения и магистральные улицы общегородского значения регулируемого движения, магистральные улицы районного значения в период пиковой загрузки (скорость сообщения $V_c \leq 15$ км/ч), а также магистральные улицы общегородского значения непрерывного движения и магистральные дороги скоростного движения при $V_c \leq 30$ км/ч.
I.МП	Магистральные дороги регулируемого движения и магистральные улицы общегородского значения регулируемого движения в межпиковый период при $V_c > 15$ км/ч.
II	Магистральные улицы районного значения в межпиковый период при $V_c > 15$ км/ч.
III	Магистральные улицы общегородского значения непрерывного движения при $V_c > 30$ км/ч.
IV	Магистральные дороги скоростного движения при $V_c > 30$ км/ч.

На основании изучения показателей УДС составляется перечень участков, подлежащих обследованию с целью охвата всей территории населенного пункта. По выбранным для обследования участкам улично-дорожной сети устанавливаются следующие показатели:

- количество полос движения в каждом направлении;
- ширина проезжей части;
- протяженность (длина, пробег) выбранного участка улично-дорожной сети;
- организация движения на перекрестках (протяженность зоны перекрестка в каждом направлении, наличие светофорного регулирования, схема разрешенных поворотов);
- средняя скорость автотранспортного потока с выделением трех основных категорий (легковые автомобили, грузовые автомобили, автобусы).

Выбранные для обследования участки улично-дорожной сети наносятся на карту-схему населенного пункта.

2) Натурные обследования на рассматриваемых участках УДС проводятся в соответствии с подходом, рекомендованным методикой ОАО «НИИ Атмосфера» [31]. В основе метода лежит инструментальный подсчет автомобилей, пересекающих контрольное сечение дороги, с их последующей классификацией. Транспортный поток подразделяется на семь основных категорий:

1. Легковые автомобили (с дифференциацией по типу используемого топлива: бензин и дизель);
2. Легкие грузовики (грузоподъемностью до 3 т) и микроавтобусы (эксплуатируемые на бензине или сжиженном нефтяном газе — СНГ).;
3. Средние и тяжелые грузовые автомобили (грузоподъемностью свыше 3 т) (на бензине и СНГ);
4. Автобусы с бензиновыми двигателями;
5. Грузовые автомобили с дизельными двигателями;
6. Автобусы с дизельными двигателями;
7. Грузовые автомобили, использующие компримированный природный газ (КПГ).

Для определения максимальной транспортной нагрузки на выбранных участках улично-дорожной сети натурные обследования выполняются в утренние и вечерние «часы пик» (с 7 до 11 часов – утренние «часы пик», с 16 до 20 часов – вечерние «часы пик»). Учет (наблюдение) проходящих транспортных средств в обоих направлениях по выбранным участкам улично-дорожной сети проводится в течение 20 минут для каждого часа в период утренних и вечерних «часов пик». Количество наблюдений должно составлять не менее 4-6 раз в утренние и вечерние «часы пик» для каждого выбранного участка улично-дорожной сети.

Интенсивность движения на выбранных участках улично-дорожной сети может оцениваться как непосредственным наблюдением, так и путем использования автоматизированных пунктов учета движения (стационарных или передвижных). В России функционирование автоматизированных систем мониторинга транспортных потоков регламентируется отраслевым документом ОДМ 218.4.033-2017 и в настоящее время ограничено сетью автодорог федерального значения [53]. Данные системы представляют собой комплексные решения для сбора, обработки, передачи и архивации информации о движении автотранспорта.

Следует отметить ряд методологических ограничений ранее рассмотренной методики. Во-первых, она не позволяет оценить эмиссию диоксида углерода (CO₂).

Во-вторых, расчет выбросов загрязняющих веществ производится исключительно для режима движения, не учитывая эмиссию в фазах запуска и прогрева двигателя, от испарения топлива и при работе на холостом ходу на регулируемых перекрестках.

Наиболее комплексной отечественной разработкой в данной сфере является «Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ от автотранспортных средств на территории крупнейших городов (на примере г. Москвы)», разработанная ОАО «НИИАТ» [71] в 2012 г. [62]. Ее ключевым преимуществом является устранение отмеченных недостатков за счет включения в расчетную модель выбросов при пуске, прогреве и от испарений топлива.

В международной практике спектр методик оценки транспортных выбросов значительно шире [43]. Глобально применяемые методы количественного определения эмиссии ЗВ от мобильных и стационарных транспортных источников основываются на данных об их эксплуатационной активности, эмиссионных коэффициентах, материальных балансах, а в ряде случаев – на информации от систем непрерывного мониторинга выбросов.

В Европе в качестве базовой методологии расчета транспортных выбросов широко применяется модель COPERT в рамках системы EMEP/CORINAIR [16]. Название CORINAIR образовано от названия общеевропейского проекта CORINE (CO-oRdination d'INformation Environnementale), к которому добавлена отсылка к воздуху (AIR). EMEP – это Европейская программа мониторинга и оценки (the European Monitoring and Evaluation Programme).

Важным преимуществом данной методологии выступает ее адаптивность к различным регламентам отчетности. Итоговые данные инвентаризации, сгенерированные по методологии CORINAIR, могут быть структурированы и представлены в трех основных стандартизированных форматах, что обеспечивает их соответствие требованиям ключевых международных систем:

1. Формат Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC/МГЭИК);

2. Формат, установленный ЕЭК ООН/ЕМЕР для отчетности по Конвенции о трансграничном загрязнении воздуха на большие расстояния (LRTAP);

3. Формат для системы мониторинга выбросов парниковых газов Европейского Союза;

Приведенная методика позволяет проводить инвентаризацию более чем 20 загрязняющих веществ. Методика учитывает выбросы от всех видов транспортных средств, включая мотоциклы, исключая внедорожную технику. Учитываются выбросы от испарения топлива, твердых частиц от износа покрышек, тормозных элементов и дорожного покрытия.

Методика имеет обширную структуру транспортного потока, подразделяется по виду топлива, рабочему объему двигателя, экологическому классу, полной массе (для грузовых и автобусов). Итоговая структура содержит 23 категории транспортных средств с возможностью добавлять новые типы транспортных средств на усмотрение пользователя.

Инвентаризация выбросов может проводиться на трех уровнях сложности и полноты (рисунок 1.6):

— первый уровень – наиболее простой способ определения выбросов загрязняющих веществ на основании потребления топлива с помощью коэффициентов выбросов, соответствующих уровню;

— второй уровень – промежуточный уровень во многом схожий с предыдущим, использует специфичные коэффициенты выбросов, зависящих от многих региональных аспектов, оцененные экспериментальными измерениями;

— третий уровень – наиболее точный уровень оценки загрязняющих веществ, требующий внушительный набор исходных данных. В качестве коэффициентов эмиссии могут быть использованы испытания конкретных двигателей.

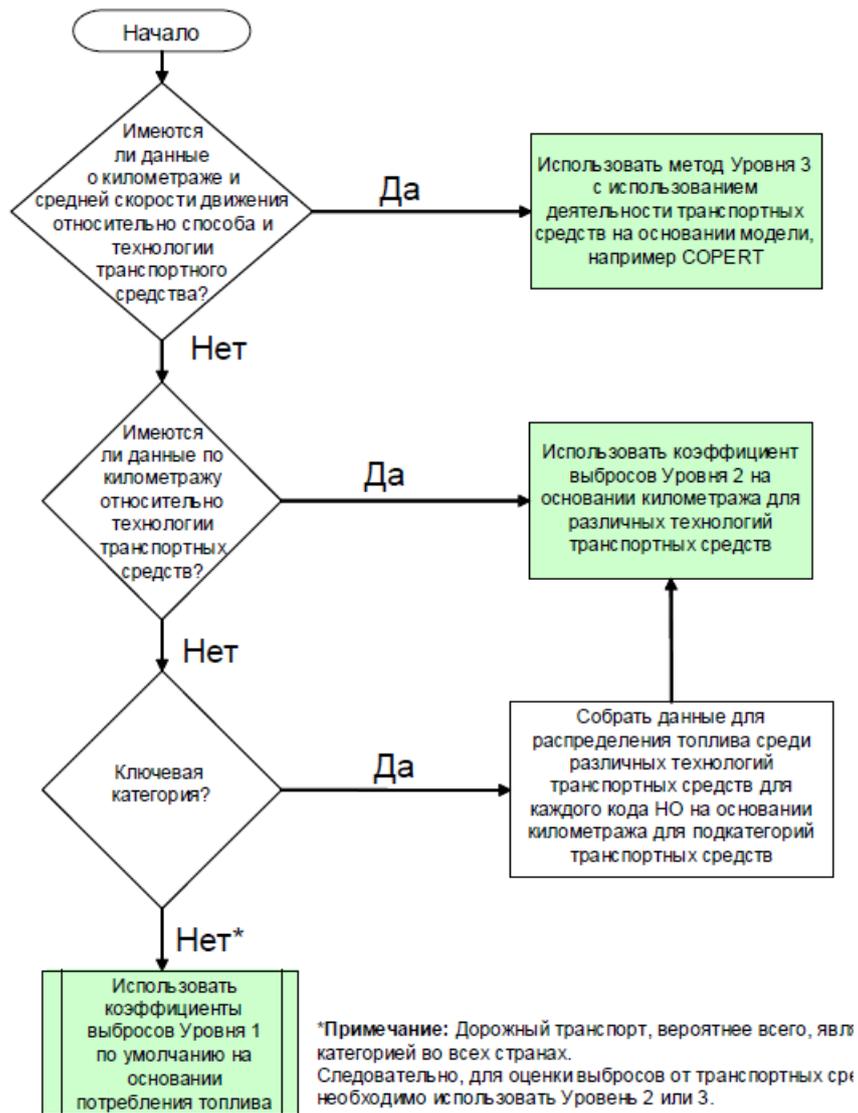


Рисунок 1.6 – Дерево принятия решений для выбросов отработавших газов от дорожного транспорта

Коэффициенты эмиссии по первому уровню представляют собой средние значения коэффициентов третьего уровня, определенные разработчиками по транспортному парку Европейского Союза образца 1995 года, что в свою очередь дает завышенные данные, при расчете выбросов загрязняющих веществ для развитых стран. Объем эмиссии диоксида углерода (CO_2) не определяется непосредственно структурой автопарка, а находится в прямой пропорциональной зависимости от количества потребленного топлива. Выбросы закиси азота (N_2O) демонстрируют зависимость как от типа и состава транспортных средств, так и от применяемых технологий нейтрализации выхлопных газов (например, каталитических нейтрализаторов). Методической основой, для определения

потребления топлива в программе, выступают заданные справочные значения удельного расхода на километр пробега, однако требование устанавливать среднегодовой пробег для каждого вида транспортного средства остается неизменным.

Программа COPERT разработана для Microsoft Windows и хорошо известна российским специалистам [16, 41, 61, 54]. Подробнее о методике указано в приложении В.

Методика TREMOD, Германия [19]

Модель TREMOD (Transport Emission Model) представляет собой немецкую методику расчета выбросов и энергопотребления на транспорте, охватывающую период с 1960 по 2030 год (см. рис. 1.7). Данный инструмент предназначен для комплексной оценки эмиссии загрязняющих веществ от различных видов транспорта Германии: автомобильного, железнодорожного, водного и авиационного. Полное название модели раскрывает ее сущность: Transport Emission Model – Energy Consumption and Emission of Transport in Germany 1960-2030 [67].

Коэффициенты эмиссии для транспортных средств просчитаны, в основном с помощью программного обеспечения TU Graz, EMPA и “TÜV Nord”. В ранних версиях использовались экологические классы до Евро-3 включительно, в последних версиях этой методики добавлен учет всех экологических классов. Интересной особенностью методики является учет выбросов некоторых особенных видов топлива: малосернистых и биотоплива.

В качестве исходных данных необходимо задать количество транспортных средств в потоке, пробег ТС, транспортную работу при перевозке пассажиров (пасс*км) и грузов (т*км). Вычисляется первичное энергопотребление (МДж) и конечное потребление топлива (бензина и дизельного), авиационного бензина и керосина (т), а также и электричества (кВт·ч) от общественной сети.

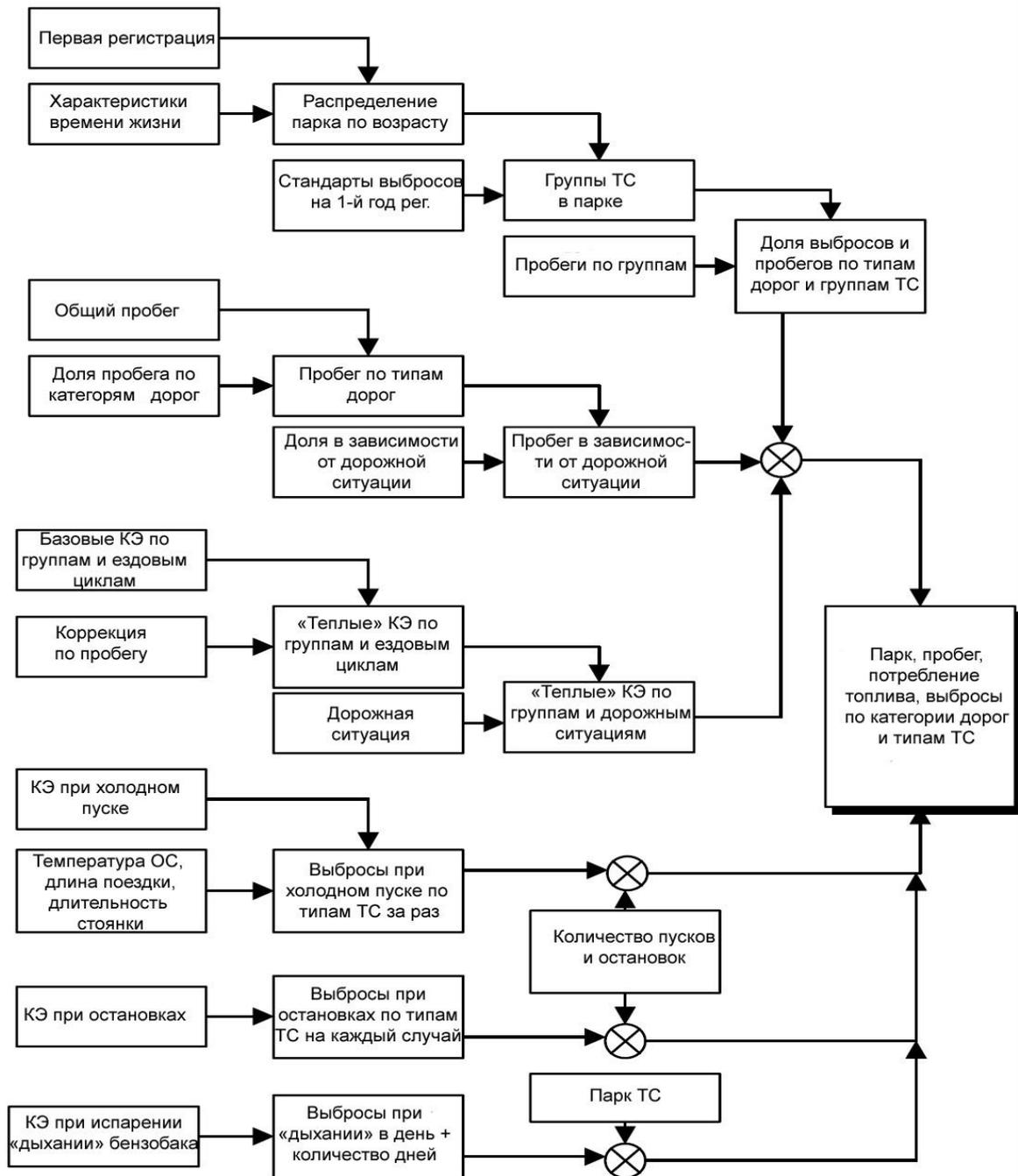


Рисунок 1.7 – Схема вычислений выбросов для легковых автомобилей с помощью TREMOD

Как и для предыдущей методики, в набор оцениваемых загрязняющих веществ входят: углеводороды (в том числе бензол, толуол и ксилол), оксид углерода, РМ для дизелей; диоксид углерода и диоксид серы, аммиак (NH₃), закись (N₂O) азота, диоксид азота (NO₂).

Прогноз структуры и численности автомобильного парка в методике TREMOD оценивается по упрощенной схеме на основании линейных зависимостей

(линий тренда), что требует дополнительной адаптации в современном мире по причине неравномерного роста автомобильного парка в разных странах от года к году.

База данных HBEFA [10]

HBEFA (Handbook Emission Factors for Road Transport) – база данных, которая содержит коэффициенты эмиссии основных загрязняющих веществ для всех типов и подтипов транспортных средств. Коэффициенты эмиссии получены с помощью натуральных замеров выбросов транспортных средств и испытаний двигателей на специализированных стендах. С помощью такой методики удобно оценивать выбросы ЗВ на различных территориях города, региона, государства. Эта модель позволяет учитывать загрязняющие вещества как на отдельно взятом участке улично-дорожной сети, так и на территории страны. В настоящее время коэффициенты выбросов загрязняющих веществ рассчитываются для временного интервала 1990-2030/35 гг. (в зависимости от страны).

Основная версия HBEFA (европейская) учитывает европейские дорожные условия и содержит типичные данные для стран ЕС: Швейцария, Швеция, Норвегия, Германия, Франция, Польша, Греция.

HBEFA чаще всего применяется при:

- составлении национальных докладов;
- прогнозировании качества воздуха на национальном, региональном и местном уровнях;
- оценке влияния последствий транспортной политики на загрязнение окружающей среды;
- прогнозировании выбросов и потребления энергии автомобильным транспортом;
- проведении прикладных научных исследований.

Публичная версия HBEFA доступна для скачивания без ограничений (для новых пользователей плата составляет 250 евро; для обладателей предыдущих версий обновление бесплатное). Эта версия позволяет увидеть коэффициенты

выбросов для различных дезагрегированных уровней (типов АТС). Для экспертов доступна расширенная версия, содержащая в себе дополнительные возможности.

База данных HBEFA имеет несколько преимуществ:

- коэффициенты эмиссии могут быть использованы для расчета выброса загрязняющих веществ в программном обеспечении COPERT. Например, при составлении раздела дорожный транспорт Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом в Российской Федерации [59];
- функционал программного комплекса включает моделирование выбросов загрязняющих веществ, адаптированное к специфике территорий: как к их масштабу, так и к уровню автомобилизации;
- позволяет учитывать выбросы основных парниковых газов (CO_2 , N_2O и CH_4) автомобильным транспортом;
- использует общедоступные программы (MS EXCEL и ACCESS) для хранения баз данных и вывода рассчитанных показателей;
- учитывает все основные виды топлива, используемые автомобильным транспортом, а не только бензина и дизельного топлива;
- учитывает европейские стандарты по ограничению выбросов ПГ и загрязняющих веществ двигателями автомобилей, большая часть которых имеет европейское происхождение.

На основании изложенного можно сделать вывод, что как отечественные, так и зарубежные методики расчета выбросов загрязняющих веществ, в том числе и парниковых газов, транспортными потоками исходят из численности, структур парков АТС, интенсивности их использования, условий движения по разным типам дорог и улиц и других факторов.

При этом наиболее детально разработанной, учитывающей максимально возможное количество влияющих на выбросы загрязняющих веществ двигателями факторов, является трехуровневая модель, реализованная в программном комплексе COPERT 5. Широкая апробация модели в 28 европейских государствах, Китае и России подтверждает ее практическую значимость. Результаты расчетов,

выполненных с помощью COPERT 5, характеризуются высокой полнотой и достоверностью, что позволяет рассматривать их в качестве референтных.

Подробнее о методике указано в приложении Б.

1.3 Методики оценки расхода топлива, энергии, энергопотребления и выбросов парниковых газов транспортными сетями городов, регионов

В международной практике, чаще всего, валовые выбросы транспортных потоков определяются как сумма выбросов отдельных АТС, движущихся в потоке на участке дороги [2,3]. Такой метод широко используется во многих странах и позволяет оценивать объемы выбросов на отдельных участках дороги имея небольшой набор исходных данных, которые достаточно легко получить: интенсивность, состав потока, средняя скорость движения транспортных средств на участке.

Между тем распространение принципа аддитивности при оценке выбросов вредных веществ, расхода топлива транспортными потоками, состоящими из конкретных марок автомобилей, не позволяет установить закономерности «экологического поведения» совокупности транспортных средств на дорожной сети [38]. Эти закономерности должны вносить коррективы в алгоритмы поведения водителей одиночных автомобилей в плотном транспортном потоке, а также управления дорожным движением с учетом использования рациональных маршрутов на сети сложной конфигурации.

Чтобы оценить возможности минимизации расхода топлива и выбросов транспортными потоками на дорожной сети в клетке территории, необходимы исходные данные по:

- составу транспортного потока - l типов АТС, $p = (p_1 \dots p_l)$ - доля каждого типа АТС в общем потоке на сети в клетке;
- удельному (на единицу пробега) расходу топлива и выбросов s -го вредного вещества конкретных марок АТС, составляющих поток в режимах $v = \text{const}$, ускорения, замедления и на холостом ходу [28].

В источнике [25] приведены результаты масштабного исследования расхода топлива и выбросов загрязняющих веществ транспортным потоком на улично-дорожной сети крупного города с помощью специально разработанной теории потоков на сетях, в частности теории дифференциальных уравнений на графах. Проанализировав приведенные результаты расчетов, можно сделать вывод о том, что для насыщенных транспортных потоков практически отсутствуют возможности добиться сокращения расхода топлива за счет перераспределения транспорта на отдельных участках сети. Аналогичные результаты получены и для выбросов токсичных веществ.

В целях транспортного планирования и регулирования дорожного движения в городах внедряются специализированные программы мониторинга. Их задача — непрерывный сбор данных о текущем состоянии и эксплуатационных параметрах улично-дорожной сети (УДС) [70].

Полученная информация служит основой для построения динамических математических моделей. Эти модели призваны анализировать эволюцию транспортной системы во времени и оценивать ее комплексное воздействие на качество жизни в городах.

При этом разработка надежных прогнозов низкоуглеродного развития транспорта, выполняемая методами сценарного моделирования, сопряжена со значительными сложностями. Основная проблема заключается в множественности взаимосвязанных факторов, определяющих развитие транспортной системы в пределах крупных городов, что существенно снижает определенность долгосрочных прогнозов. [74].

Структура основных составляющих прогнозной транспортной модели приведена на рисунке 1.8.

Построение прогнозных транспортных моделей происходит в специальных программах, таких как VISSIM, TRANSIMS, EMME /2, SATURN, PTV Vision и другие [75,56].



Рисунок 1.8 – Типичная структура основных блоков прогнозной транспортной модели

Оценка качества транспортной модели представляет собой обязательный этап ее верификации. Для этого используется комплекс показателей, которые можно разделить на три ключевые группы [69, 74]:

1. Показатели масштаба и структуры модели:

- Статистические характеристики (размер): число узлов, сегментов (отрезков), многоуровневых пересечений, транспортно-планировочных районов, остановок общественного транспорта и маршрутов.

2. Показатели детализации модели транспортного спроса:

- Учет различных режимов передвижения (индивидуальный и общественный транспорт);
- Количество включенных транспортных систем (разных видов и типов);
- Число слоев (страт) спроса;
- Спецификация функций предпочтения (единая для всех слоев или дифференцированная).

3. Показатели адекватности результатов моделирования:

- Количество контрольных точек (мест подсчета) для калибровки и валидации;
- Коэффициент корреляции между модельными и натурными данными;
- Величины средней относительной и абсолютной ошибок расчета.

Надежность и точность транспортной модели количественно определяются через предложенную систему оценочных показателей [24].

Очевидно, что для оценки эффективности транспортной системы крупного города следует использовать математические модели ее функционирования. С помощью таких моделей можно оценивать энергопотребление транспортного потока, энерго-экологическую эффективность различных решений по организации дорожного движения, рассчитывать выбросы загрязняющих веществ на участках дорожной и улично-дорожной сети. Более подробно об этом написано в [72].

С развитием компьютерных технологий, логичным продолжением приведенного выше исследования стало моделирование характеристик транспортных потоков с использованием методов транспортного моделирования на сетях [21], расчет расхода топлива и выбросов загрязняющих веществ транспортными потоками на всей УДС крупного.

В названии УДС присутствует слово «сеть», в математическом понимании – это связный геометрический граф, обеспечивающий возможность моделирования транспортировки пассажиров и грузов из любого узла в любой другой. Таким образом можно исследовать свойства УДС как геометрического объекта [37].

Исследование геометрического объекта на карте возможно реализовать несколькими способами, однако самый удобный и эффективный из них – это использование геоинформационных систем.

В [34] рассмотрено использование теории графов и ГИС на примере оценки выбросов вредных веществ в городе Москве в 2011 и 2018 годах.

Существует несколько способов территориальной привязки выбросов загрязняющих веществ с помощью ГИС [35]:

- 1) модели пространственных данных:
 - а) растровые модели данных;

b) векторные модели данных:

- (1) векторные нетопологические;
 - (2) векторные топологические модели.
- 2) ГРИД представление;
 - 3) TIN представление;
 - 4) модель «Сущность-связь».

В данном случае, оценка выбросов дисперсных частиц транспортными потоками на УДС города выполняются с использованием программного комплекса COPERT 5 [19].

Принципиально важным моментом является привязка полученных значений валовых выбросов загрязняющих веществ, генерируемых транспортным потоком в секторах улично-дорожной сети ко всей территории города Москвы в пределах МКАД.

В исследовании [69] для решения данной задачи производилась разбивка территории города с использованием геоинформационных технологий на участки (графы) размером 580×580 м (всего 2849 участков). Внутри каждого из участков территории определяется протяженность УДС, с привязкой к полосе движения. Таким образом удается добиться высокой достоверности данных, используемых для расчетов в ГИС. Привязка к полосе движения также дает возможность для каждого участка УДС оценивать дорогу в разных направлениях по-разному с учетом их действительной загрузки и средней скорости движения.

С учетом этих данных, а также удельных значений (на 1 км 1-ой полосы движения) выбросов загрязняющих веществ, была осуществлена привязка валовых выбросов от транспортных потоков в 2011 и 2018 годах на всей территории города. Разница между выбросами считается в автоматическом режиме с помощью ГИС – технологии и позволяет наглядно визуализировать результаты [53, 16].

В таблице 1.4 и на рисунке 1.8 приведены результаты такой привязки выбросов CO_2 к территории города Москвы в пределах МКАД, источниками которых являются транспортные потоки на УДС.

Таблица 1.4 – Результаты кластеризации графов по уровню CO₂

Номер кластера	Диапазоны валовых выбросов CO ₂ , тыс. т/год	Количество участков территории (580x580 м), шт.			Площадь территории, км ²		
		2011 г.	2018 г.	Разница	2011 г.	2018 г.	Разница
1	0–1,69	407	430	+ 23	136,9	144,6	+7,7
2	1,69–8,69	410	529	+ 119	137,9	177,9	+40,0
3	8,69–13,19	405	512	+107	136,2	172,2	+35,3
4	13,19–17,39	407	460	+53	136,9	154,7	+17,8
5	17,39–21,97	406	378	- 28	136,6	127,1	- 9,5
6	21,97–29,50	409	312	-97	137,5	104,9	- 32,6
7	29,50–109,31	405	228	-177	136,2	76,7	- 59,5

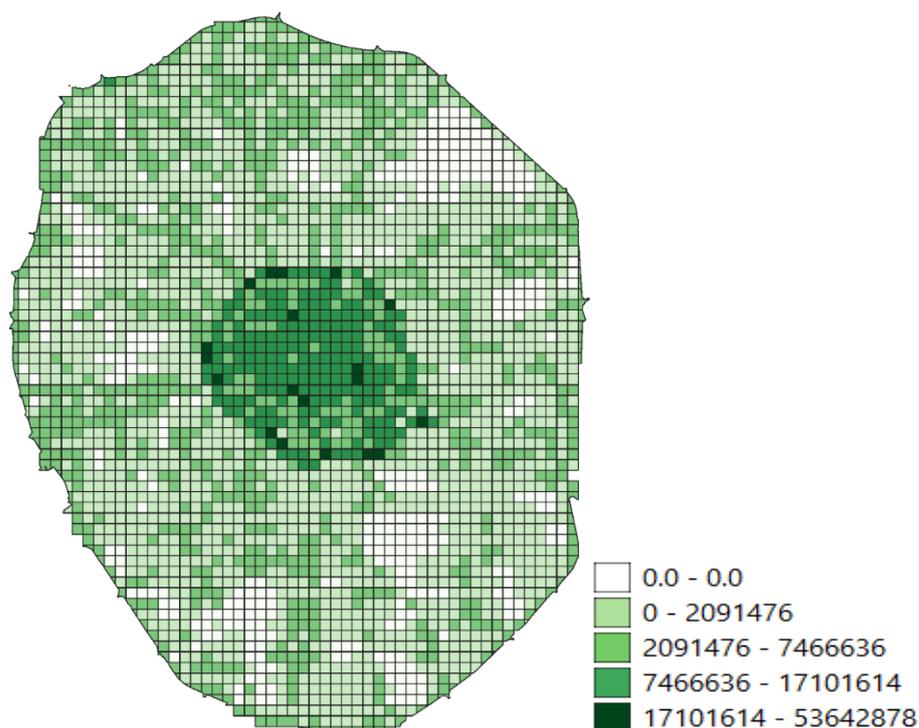


Рисунок 1.9 – Картограмма территории г. Москвы с результатами оценки сокращения валовых выбросов CO₂ транспортными потоками на УДС в 2011 и 2018 гг.

Как следует из рисунка 1.9 по итогам 2018 года произошло перераспределение численности единичных участков площадью 580x580 м в данных диапазонах – увеличилось их количество, а, следовательно, и площадь городской территории с малыми значениями валовых выбросов CO₂ (кластеры 1–4). При этом сократилось количество единичных участков в диапазонах с высоким уровнем значений CO₂ (кластеры 5–7).

Логичным продолжением приведенного выше исследования стала транспортная модель для оценки выбросов парниковых газов от автомобильного и внедорожного транспорта на национальном уровне [63].

Транспортная модель создавалась на основе методики COPERT 5. Верификация модели [23,58] достигалась путем создания реляционной базы данных транспортных средств, находящихся в парке Российской Федерации за 2010-2021 гг. Модель включает в себя 206 расчетных модельных групп. Расчет выбросов загрязняющих веществ от автомобильного и внедорожного транспорта проводился по субъектам РФ. Оценка эмиссии загрязняющих веществ от автомобильного и внедорожного транспорта осуществлялась с детализацией в разрезе субъектов Российской Федерации. Результаты расчетов валовых выбросов ключевых парниковых газов (диоксида углерода CO₂, закиси азота N₂O, метана CH₄), а также газов-прекурсоров (оксида углерода CO, оксидов азота NO_x и неметановых летучих органических соединений NMVOC) представлены в таблице 1.5. В ней приведены суммарные показатели по Российской Федерации в целом, а также отдельно по Калининградской области и Ставропольскому краю за 2020 год.

Таблица 1.5 – Результаты оценки выбросов ПГ в РФ, Калининградской области и Ставропольском крае в 2019 году, тонн CO₂-экв.

Параметр	Калининградская область	Ставропольский край	РФ
Выбросы основных ПГ (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)	1 011 021	3 306 303	161 525 256
Выбросы газов-прекурсоров (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, CO, NO _x , NMVOC)	1 029 305	3 374 886	166 276 384

Вклад различных веществ в оценку выбросов ПГ (CO₂, CH₄, N₂O, CO, NO_x, NMVOC) автотранспортом в РФ представлен на рисунке 1.10.

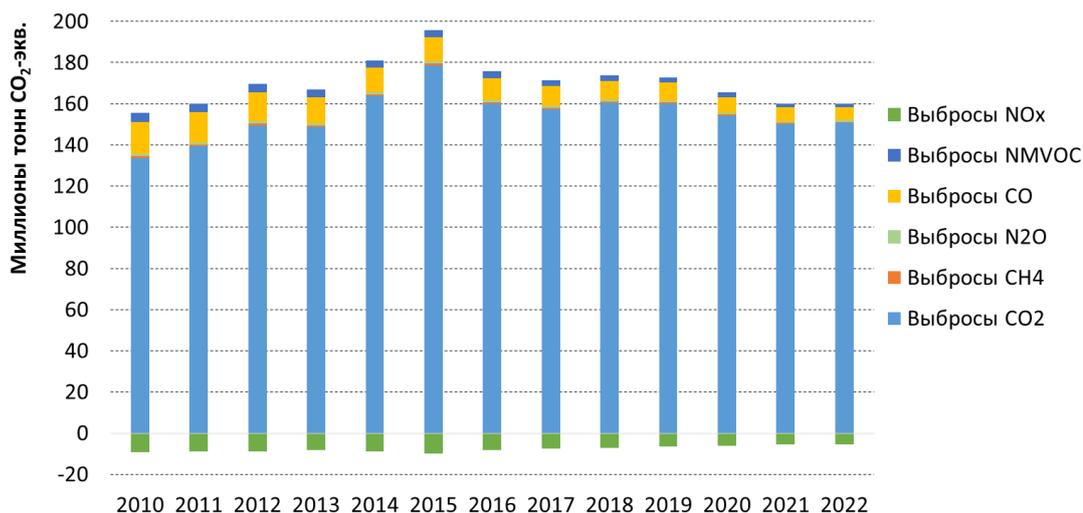


Рисунок 1.10 – Вклад различных веществ в оценку выбросов транспортных ПГ (CO₂, CH₄, N₂O, CO, NO_x, NMVOC) автотранспортом РФ

Из рисунка 1.10 следует, что выбросы так называемых газов-прекурсоров CO, NO_x, NMVOC более значимы, чем CH₄ и N₂O [68].

Парниковые газы-прекурсоры — это вещества, которые сами по себе обладают низким парниковым эффектом, но вступают в химические реакции в атмосфере и превращаются в парниковые газы. В атмосфере под воздействием солнечной радиации оксиды азота (NO_x) и летучие органические соединения (ЛОС) вступают в фотохимические реакции. Ключевым продуктом этих реакций является приземный озон (O₃) — высокоактивное окислительное соединение. Параллельно в атмосфере протекает процесс окисления оксида углерода (CO) с образованием диоксида углерода (CO₂). Автор диссертационного исследования считает, что необходимо учитывать парниковые газы-прекурсоры наравне с традиционными парниковыми газами при мониторинге их выбросов от автомобильного транспорта.

На основании вышеописанного можно сделать вывод о том, что объединение геоинформационных технологий и теории графов дает возможность получить не только численные значения выбросов загрязняющих веществ, в том числе парниковых газов, но и визуальное представление об основных источниках таких выбросов на транспортных сетях крупных городов и регионов.

1.4 Мероприятия по снижению энергопотребления одиночных транспортных средств и транспортных потоков

Мероприятия по снижению энергопотребления одиночных транспортных средств и транспортных потоков обычно рассматриваются в комплексных схемах организации дорожного движения в муниципальных образованиях, правила подготовки которых регламентируются нормативным документом¹. Разработка этого документа предусматривает:

- сбор исходных данных,
- выявление недостатков в части организации дорожного движения и обустройства автомобильных дорог и улиц,
- проведение натурных обследований существующей дорожно-транспортной ситуации,
- формирование системы целевых показателей реализации КСОДД (социальный риск; интенсивность дорожного движения, средняя скорость движения транспортных средств, плотность движения; параметры эффективности организации дорожного движения, характеризующие задержки в движении транспортных средств и (или) пешеходов; масса выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников на улично-дорожной сети и других);
- формирование нескольких вариантов проектирования КСОДД, основанных на прогнозных данных демографического, социально-экономического и градостроительного развития муниципального образования и т.д. из которых выбирается наиболее подходящий;
- разработка математических моделей дорожной сети на макро- и микроуровнях;
- выбор основных мероприятий по организации дорожного движения и очередность их реализации;

¹ "Об утверждении Правил подготовки документации по организации дорожного движения". Приказ Министерства транспорта РФ от 30 июля 2020 г. N 274

- оценка объема и источников финансирования мероприятий, а также их эффективность. Оценка эффективности реализации вариантов проектирования КСОДД должна проводиться с использованием средств математического моделирования.

Основные мероприятия (таблица 1.6) по организации дорожного движения, как правило, затрагивают объекты дорожной инфраструктуры и проектирование дорожной сети [50].

Как видно из таблицы 1.6, самый популярный, точный и документально подтвержденный способ оценки эффективности различных мер организации дорожного движения – математическое моделирование.

Математическое моделирование, согласно ОДМ «Методические рекомендации по оценке качества организации дорожного движения (ОДД)²», позволяет вычислить коэффициент корреляции транспортного движения для оценки организации движения $k_{ИТ}$. Полученное значение будет свидетельствовать о качестве организации дорожного движения в результате разработки КСОДД. В направлении прогнозирования транспортного спроса и интенсивности движения транспортных потоков проводилось исследование [7].

² "Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Использованию программных продуктов математического моделирования транспортных потоков при оценке эффективности проектных решений в сфере организации дорожного движения" (согласованы Минтрансом России 13.07.2017)

Таблица 1.6 – Основные мероприятия по организации дорожного движения и варианты оценки их эффективности³

№ п/п	Мероприятия по организации дорожного движения	Маркеры эффективности
1	Разделение движения транспортных средств на однородные группы в зависимости от категорий транспортных средств, скорости и направления движения, распределение их по времени движения	Математическое моделирование; Мониторинг выбросов ЗВ; БДД;
2	Повышение пропускной способности дорог, в том числе посредством устранения условий, способствующих созданию помех для дорожного движения или создающих угрозу его безопасности, формирование кольцевых пересечений и примыканий дорог, реконструкция перекрестков и строительство транспортных развязок	Математическое моделирование; Мониторинг выбросов ЗВ; БДД; Транспортная доступность;
3	Оптимизация светофорного регулирования, управление светофорными объектами, включая адаптивное управление	Математическое моделирование; Мониторинг выбросов ЗВ; БДД; Транспортная доступность;
4	Согласование (координация) работы светофорных объектов (светофоров) в границах территорий, определенных в документации по организации дорожного движения	Математическое моделирование; Мониторинг выбросов ЗВ; БДД; Транспортная доступность;
5	Развитие инфраструктуры в целях обеспечения движения пешеходов и велосипедистов, в том числе строительство и обустройство пешеходных переходов	Математическое моделирование; Мониторинг выбросов ЗВ; БДД; Транспортная доступность;
6	Введение приоритета в движении маршрутных транспортных средств	Математическое моделирование; Транспортная доступность; Мониторинг выбросов ЗВ;
7	Развитие парковочного пространства (в том числе за пределами дорог)	Экономические показатели; Транспортная доступность;
8	Введение временных ограничений или прекращение движения транспортных средств	Математическое моделирование; Мониторинг выбросов ЗВ;
9	Применение реверсивного движения и организация одностороннего движения транспортных средств на дорогах или их участках, перечню пересечений, примыканий и участков дорог, на которых необходимо введение светофорного регулирования	Математическое моделирование; Мониторинг выбросов ЗВ; БДД;

³ "Об утверждении Правил подготовки документации по организации дорожного движения". Приказ Министерства транспорта РФ от 30 июля 2020 г. N 274

Продолжение таблицы 1.6.

10	Обеспечение транспортной и пешеходной связанности территорий	Математическое моделирование; БДД; Транспортная доступность;
11	Организация движения маршрутных транспортных средств	Математическое моделирование; Транспортная доступность; Мониторинг выбросов ЗВ;
12	Организация или оптимизация системы мониторинга дорожного движения, установка детекторов транспорта, организация сбора и хранения документации по организации дорожного движения	Мониторинг выбросов ЗВ; Транспортная доступность; БДД;
13	Совершенствование системы информационного обеспечения участников дорожного движения	Транспортная доступность; БДД;
14	Организация пропуска транзитных и (или) грузовых транспортных средств, включая предложения по организации движения тяжеловесных и (или) крупногабаритных транспортных средств, транспортных средств, осуществляющих перевозку опасных грузов, а также по допустимым весогабаритным параметрам таких средств	Математическое моделирование; Мониторинг выбросов ЗВ; БДД; Транспортная доступность;
15	Регулирование скоростного режима движения транспортных средств на отдельных участках дорог или в различных зонах	Мониторинг выбросов ЗВ; БДД;
16	Обеспечение благоприятных условий для движения маломобильных групп населения	Транспортная доступность; БДД; Социальные показатели;
17	Обеспечение маршрутов движения детей к образовательным организациям	Транспортная доступность; БДД; Социальные показатели;
18	Развитие сети дорог, дорог или участков дорог, локально-реконструкционным мероприятиям, повышающим эффективность функционирования сети дорог в целом	Математическое моделирование; Мониторинг выбросов ЗВ; БДД; Транспортная доступность;
19	Расстановка работающих в автоматическом режиме средств фото- и видеофиксации нарушений Правил дорожного движения Российской Федерации	БДД; Экономические показатели;

По мнению автора, для оценки качества организации дорожного движения наряду с использованием математического моделирования характеристик трафика, должны оцениваться выбросы загрязняющих веществ, безопасность дорожного движения, транспортная доступность, социальные и экономические показатели.

При этом рациональной сферой использования приведенной в главе 2 настоящего диссертационного исследования методики является оценка энергетической эффективности решений, принимаемых в комплексных схемах организации дорожного движения (КСОДД), в проектах организации дорожного движения (ПОДД) и проектах автоматизированных систем управления дорожным движением (ПАСУДД) не только на уровне отдельных светофорных объектов, пересечений, выделенных полос движения и т.д., но и на сетевом уровне.

1.5 Цель и задачи диссертационного исследования

Приведенный выше анализ показал следующее.

— В области нормирования и оценки для одиночных ТС в Российской Федерации существует системный пробел. Действующая основная методика (Распоряжение Минтранса № АМ-23-р) обладает недостаточной прозрачностью, не позволяет проводить достоверную оценку выбросов парниковых газов. В отличие от этого, международная практика (ЕС, США, Япония) сместилась в сторону использования стандартизированных и постоянно совершенствуемых ездовых циклов (WLTP, EPA), данные которых открыто предоставляются потребителям.

— Мониторинг фактического расхода топлива характеризуется широким спектром методов — от простейших, но наименее точных (учет по чекам АЗС), до высокоточных, но дорогостоящих и сложных в реализации (врезные расходомеры). Наиболее перспективными и сбалансированными по точности, стоимости и трудоемкости представляются методы, использующие

штатные бортовые системы автомобиля через CAN-шину и диагностический разъем OBD-II, а также современные беспроводные датчики уровня топлива.

— Для оценки выбросов от транспортных потоков отечественные одноуровневые методики (ИКТП-НИИАТ, Союздорнии) морально устарели и не учитывают всего многообразия влияющих факторов. Наиболее комплексной и адаптируемой является трехуровневая модель COPERT, широко применяемая в Европе и России. Она позволяет проводить инвентаризацию выбросов с различной степенью детализации в зависимости от объема исходных данных и учитывает не только выхлопные газы, но и испарения, а также выбросы от износа дорожного полотна и тормозной системы.

— Оценка показателей на уровне транспортных сетей городов и регионов требует применения сложных инструментов математического и имитационного моделирования (VISSIM, PTV Vision и др.). Анализ показывает, что в условиях насыщенных потоков возможности снижения расхода топлива и выбросов за счет локальных решений на отдельных участках сети крайне ограничены, что подтверждает необходимость системного, сетевого подхода к управлению транспортными потоками.

— Эффективность мероприятий по снижению энергопотребления и выбросов в рамках комплексных схем организации дорожного движения (КСОДД) не может быть достоверно оценена без применения средств математического моделирования. Именно этот инструмент является ключевым для прогнозирования изменений и обоснования принимаемых решений, наряду с мониторингом таких показателей, как безопасность дорожного движения, транспортная доступность и экологические параметры.

— Существует необходимость разработки и внедрения более совершенных, прозрачных и комплексных методик, интегрирующих лучшие отечественные наработки и международный опыт, а также активно использующих современные технологии сбора данных и математического моделирования для достоверной оценки и управления энергопотреблением и

экологическими показателями транспортной системы на всех уровнях — от единичного автомобиля до транспортных потоков в крупном городе.

Целью настоящего исследования является 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 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 (АТС) 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.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГО-ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ КРУПНОГО ГОРОДА

2.1 Оценка расхода топлива, энергии, энергопотребления и выбросов парниковых газов единичными колесными транспортными средствами

2.1.1 Методика оценки энергопотребления одиночных колесных транспортных средств



Рисунок 2.1 – Принципиальная схема методики

Методика оценки энергопотребления одиночных колесных транспортных средств построена на основе анализа литературы и создания базы данных с основными техническими характеристиками транспортных средств. С использованием данных заводов-изготовителей, приведенных в публичном пространстве сети интернет, значений базовых значений расходов топлива конкретных моделей легковых АТС, приведенных в таблицах нормативной методики по распоряжению Минтранса № АМ-23-р, были сформированы матрицы значений показателей свыше 600 моделей пассажирских и грузовых АТС полной массой до 3,5 т при использовании в ДВС бензина (484 модели АТС), дизельного топлива (95 моделей АТС) и электроэнергии (62 модели АТС).

На основании анализа и обобщения литературы, сформированной информационной базы, разработан комплексный показатель K , который состоит из наиболее значимых (влияющих на базовый расход топлива) одиночных показателей и установлены достоверные зависимости его от базового расхода топлива, приведенного в методических указаниях по распоряжению Минтранса 23-р, т. е. при расчете в ездовых циклах по ГОСТ 54801-2011 Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. В этом ГОСТе режимы испытаний для КТС полной массой до 3,5 т берутся из Правила ЕЭК ООН № 101.

Формула для расчета комплексного показателя для автомобилей с ДВС имеет вид:

$$K = M \times V_{\text{ц}} \times D \quad (2.1)$$

Формула для расчета комплексного показателя для электромобилей имеет вид [15]:

$$K = M \times D \quad (2.2)$$

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

Фактор обтекаемости (D) напрямую влияет на расход топлива транспортного средства и представляет собой произведение трех величин:

коэффициента аэродинамического сопротивления (C_x), площади Миделя (F_M) и плотности воздуха (ρ) и рассчитывается по формуле:

$$D = 0,5 \times C_x \times F_M \times \rho, \quad (2.3)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, его значение для легковых автомобилей чаще всего лежит в интервале от 0,25 до 0,45. Является справочной величиной, найти можно в брошюрах производителей или в открытых базах данных. F_M – площадь Миделя, m^2 ; ρ – плотность воздуха, kg/m^3 . Принимаем $1,225 kg/m^3$.

В процессе формирования базы данных с результатами расчетной или экспериментальной оценки показателя C_x в формуле 2.4 выяснилось, что для некоторых моделей транспортных средств коэффициент аэродинамического сопротивления (C_x) не указывается. Ввиду того, что коэффициент аэродинамического сопротивления оказывает существенное влияние на величину базового расхода топлива, было принято решение выявить наличие достоверных зависимостей коэффициента аэродинамического сопротивления от года выпуска транспортных средств с кузовами разных типов [57].

Выполнен анализ (табл. 2.1.) изменения коэффициента аэродинамического сопротивления 579 моделей пассажирских и грузовых автомобилей полной массой до 3,5 т за период с 1970 по 2025 год, имеющих следующие типы кузовов: седан, лифтбэк, купе, кабриолет, фастбэк, хэтчбек, универсал, кроссовер, пикап, внедорожник, минивэн, АТС с тяговым электродвигателем.

Таблица 2.1 – Расчетные формулы коэффициента аэродинамического сопротивления (C_x)

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

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

Площадь Миделя – наибольшая площадь сечения в направлении, перпендикулярном скорости, рассчитывается по формуле:

$$F_M = 0,81 \times B \times H, \quad (2.4)$$

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

С использованием приведенных в формулах (2.1 – 2.4) исходных данных и результатов базовых норм расхода топлива по АМ-23-Р, с учетом группировки транспортных средств по виду используемого топлива, были получены достоверные зависимости базового расхода топлива (энергии) от комплексного показателя K .

Формулы для расчета базового расхода топлива (энергии) приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – 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 2.1 или 2.2.

К сожалению, выявить достоверных зависимостей удельного (на 100 км пути) расхода топлива разных типов грузовых АТС и автобусов полной массой более 3,5 т в ездовых циклах не удалось.

Для достижения поставленной цели было принято решение использовать базу данных MARLIS, (НБЕФА 3.1), которая содержит в себе информацию о пробеговых выбросах основных загрязняющих веществ (СО, СО₂, НС, NO_x, РМ), полученных расчетно-экспериментальным путем независимыми лабораториями в городском, загородном и смешанном ездовых циклах движения WLTC грузовых автомобилей экологических классов 0 – 6 с разными системами подавления выбросов, разделенных на 8 групп по полной массе.

Фрагмент информационной базы MARLIS удельных выбросов загрязняющих веществ грузовых автомобилей полной массой от 3,5 до 7,5 т в городском, смешанном и загородном цикле WLTC изображен на рис 2.2.

Component	Subsegment	SizeClasse	EmConcept	EFA_MW	EFA_rural	EFA_urban
CO	RT <=7.5t 80ties	RT <=7,5t	HGV-D-Euro-0	1,60	1,57	2,24
CO2(rep.)	RT <=7.5t 80ties	RT <=7,5t	HGV-D-Euro-0	382,35	350,34	381,58
HC	RT <=7.5t 80ties	RT <=7,5t	HGV-D-Euro-0	0,58	0,63	1,40
NO _x	RT <=7.5t 80ties	RT <=7,5t	HGV-D-Euro-0	4,99	4,48	4,28
PM	RT <=7.5t 80ties	RT <=7,5t	HGV-D-Euro-0	0,24	0,24	0,35
CO	RT <=7.5t Euro-I	RT <=7,5t	HGV-D-Euro-I	0,50	0,53	0,78

Рисунок 2.2 – Фрагмент информационной базы MARLIS со значениями удельных выбросов загрязняющих веществ грузовыми автомобилями полной массой от 3,5 до 7,5 т разных экологических классов в городском, смешанном и загородном цикле WLTC, г/км

Значение базового расхода топлива может быть оценено с использованием формулы, основанной на принципе баланса углерода (законе сохранения массы). Согласно этому принципу, весь углерод, содержащийся в израсходованном топливе, должен быть учтен в составе компонентов отработавших газов. Для расчета применяются значения удельных (пробеговых) выбросов загрязняющих веществ, представленные на рисунке 2.2. Формула имеет следующий вид:

$$G_T = \frac{C_{CO_2} \times E_{CO_2} + C_{CO} \times E_{CO} + C_{CH} \times E_{CH} + C_{PM} \times E_{PM}}{C_q \times \rho_T \times 10}, \text{ л/км} \quad (2.5)$$

где C_{CO_2} , C_{CO} , C_{CH_4} , C_{PM} – содержание углерода в соответствующих соединениях, составляющих топлива, %; E_{CO_2} , E_{CO} , E_{CH_4} , E_{PM} – пробеговые выбросы углекислого газа, угарного газа, углеводородов, дисперсных частиц соответственно, г/км. ρ_T – плотность топлива при 20°C, кг/л.

С использованием формулы 2.5 и данных пробеговых выбросов ЗВ выполнена оценка базового расхода топлива грузовых автомобилей и автобусов соответствующих категорий (таблице 2.3, 2.4).

Таблица 2.3 – Результаты расчета базового расхода топлива (л/100 км) для 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 2.4 – Результаты расчета базового расхода топлива (л/100 км) для автобусов разных групп по полной массе разных экологических классов и средств подавления выбросов

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

*EGR – Exhaust Gas Recirculation – Система рециркуляции отработавших газов

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

Информационная база MARLIS, помимо разделения грузовых автомобилей по полной массе, имеет разделение транспортных средств по экологическому классу с разными системами подавления выбросов (EGR, SCR).

Для получения эксплуатационной нормы расхода топлива необходимо к базовой норме расхода топлива применить повышающие/понижающие коэффициенты в соответствии с распоряжением Минтранса России от 14 марта 2008 г. № АМ-23-р.

2.1.2 Расширенная версия методики оценки энергопотребления одинокных колесных транспортных средств с тяговым электродвигателем

Для более точного определения эксплуатационного расхода одиночного колесного транспортного средства любого класса используется математическое моделирование.

Математическое моделирование движения АТС с любым типом энергоустановки и видом используемого топлива (энергии) заключается в решении уравнения тягового баланса, которое основывается на положениях теории автомобиля [аа]. В качестве исходных данных используется 24 показателя, характеризующих конструкцию АТС и его эксплуатационных свойств с разными источниками энергии, включая тяговый электропривод. Использование данного детального расчета позволяет выполнить анализ влияния на удельный расход энергии:

- показателей конструкции АТС;
- режимов движения АТС;
- конструкции и характеристик дорожного покрытия;
- агрегатов АТС;
- метеоусловий и других факторов.

В данной методике типичные режимы движения автомобиля задаются ездовым циклом, состоящим из этапов холостого хода, разгона, установившегося движения, замедления и торможения [34,37]. В качестве базового ездового цикла остается WLTP.

В общем случае суммарная сила сопротивления движению АТС с любым видом источника энергии складывается из сил сопротивления качению колес, подъему, сопротивления воздуха, силы инерции.

Сила сопротивления качению колес определяется по формуле:

$$F_R = g \times m_t \cdot \times (f_0 + f_v \times v) \times \cos \alpha, \text{ Н} \quad (2.6)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; m_t – испытательная масса транспортного средства, кг; f_0 – коэффициент сопротивления качению колес при скорости близкой к нулю; f_v – поправка к коэффициенту сопротивления качению колес, учитывающая влияние на него скорости движения транспортного средства, выражаемой в м/с, α – угол продольного уклона дороги.

Сила сопротивления подъему определяется по формуле:

$$F_A = K_{BF} \times v_A^2 = 0.5 \times c_x \times \rho_A \times A_F \times v_A^2, \text{ Н} \quad (2.7)$$

где K_{BF} – фактор аэродинамической обтекаемости, кг/м; v_A – скорость воздуха, обтекающего автомобиль вдоль его продольной оси, м/с; c_x – коэффициент аэродинамического сопротивления; ρ_A – плотность воздуха; A_F – площадь Миделя, м², вычисляется по формуле 2.4:

Сила сопротивления инерции определяется по формуле:

$$F_I = a \times m_t \times \delta_S, \text{ Н} \quad (2.8)$$

где a – ускорение продольного движения ТС, м/с²; m_t – испытательная масса транспортного средства, кг; δ_S – коэффициент учета вращающихся масс.

Коэффициент учета вращающихся масс определяется по формуле:

$$\delta_S = 1 + \frac{J_E \times u_T^2 \times \eta_T}{r_k \times r_d \times m_t} + \frac{\sum J_W}{r_k \times r_d \times m_t}, \text{ Н} \quad (2.9)$$

где J_E – момент инерции двигателя, кг*м³; J_W – момент инерции колеса, кг*м²; m_t – испытательная масса ТС, кг; η_T – КПД трансмиссии; u_T – передаточное отношение трансмиссии; r_k – кинематический радиус колеса, м; r_d – динамический радиус колеса, м.

Вместо значения динамического радиуса колеса приблизительно можно использовать значение статического радиуса (r_s), рассчитываемого по формуле:

$$r_d \cong r_s = 0.5 \times d_r + \frac{H_T}{B_T} \times B_T \times \lambda_{cv}, \text{ м} \quad (2.10)$$

где d_r – посадочный диаметр обода колеса, м; B_T – ширина профиля шины, м; $\frac{H_T}{B_T}$ – отношение высоты к ширине профиля шины; λ_{cv} – коэффициент деформации шины под воздействием вертикальной нагрузки ($\lambda_{cv} = 0.82$).

Значение кинематического радиуса колеса приблизительно можно определить по формуле:

$$r_k \cong 1.05 \times r_d - T_W \times \lambda_{ct}, \text{ м} \quad (2.11)$$

где T_W – крутящий момент, передаваемый колесом, Н*м; λ_{ct} – коэффициент тангенциальной эластичности шины под воздействием передаваемого крутящего момента.

Значение момента инерции колес можно приблизительно определить по формуле:

$$J_W \cong 0.85 \times m_T \times r_T^2 + 0.78 \times m_R \times r_R^2, \text{ кг/м}^2 \quad (2.12)$$

где m_T – масса шины, кг; m_R – масса обода колеса, кг; r_T – радиус шины в свободном состоянии, м; r_R – радиус обода колеса, м. Потери энергии в агрегатах транспортного средства оцениваются при помощи их КПД.

В общем случае КПД агрегатов зависит от режимов их работы. В данной методике они приняты постоянными: КПД трансмиссии – 0.98; КПД электромотора в тяговом режиме/режиме рекуперации – 0.96/0.90; КПД инвертора – 0.95; КПД тяговой аккумуляторной батареи (АКБ) в режиме разряд/заряд – 0.90.

В качестве примера на рисунок 2.3 приведен график изменения работы сил сопротивления движению электромобиля Tesla Model 3 Long Range в европейском городском ездовом цикле и энергопотребления без учета финальной зарядки аккумуляторной батареи от сети [22]. Исходные данные указаны в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Исходные данные для расчетной оценки расхода электроэнергии на тягу автомобиля Tesla Model 3 Long Range.

№ п/п	Наименование показателя	Значение
1	Снаряженная масса, кг	1726
2	Полная масса, кг	2180
3	Испытательная масса (ЕЭК ООН № 101), кг	1826
5	Коэффициент обтекаемости C_x	0,23
6	Габаритная ширина, м	1,849
7	Габаритная длина, м	1,443
8	Площадь Миделя, m^2	2,16
9	Плотность воздуха, kg/m^3	1,225
10	Фактор обтекаемости, kg/m	0,3
11	Передаточное число главной передачи	9
13	Размер шин	235/45R18
14	Статический радиус колеса, м	0,315
15	Кинематический радиус колеса, м	0,331
16	Момент инерции колеса, $kg \cdot m^2$	1,20
18	Коэффициент сопротивления качению колес	0,013
19	Мощность электродвигателя, кВт	335
20	Крутящий момент электродвигателя, Н*м	600
21	Базовая частота вращения электродвигателя, об/мин	5532
22	Максимальная скорость, км/ч	233
23	Максимальная частота вращения электродвигателя, об/мин	16778
24	Скоростной фактор электродвигателя	3,15
25	Момент инерции электромотора, $kg \cdot m^2$	4,50
26	КПД трансмиссии	0,98
27	КПД электромотора в тяговом режиме	0,96
28	КПД электромотора в режиме рекуперации	0,9
29	КПД инвертора	0,95
30	КПД батареи в режиме разряд/заряд	0,9
31	Удельная мощность Вт/кг	202,9
32	Класс согласно ГТП ООН № 15	3b
33	Емкость аккумуляторной батареи, кВт*ч	79,5

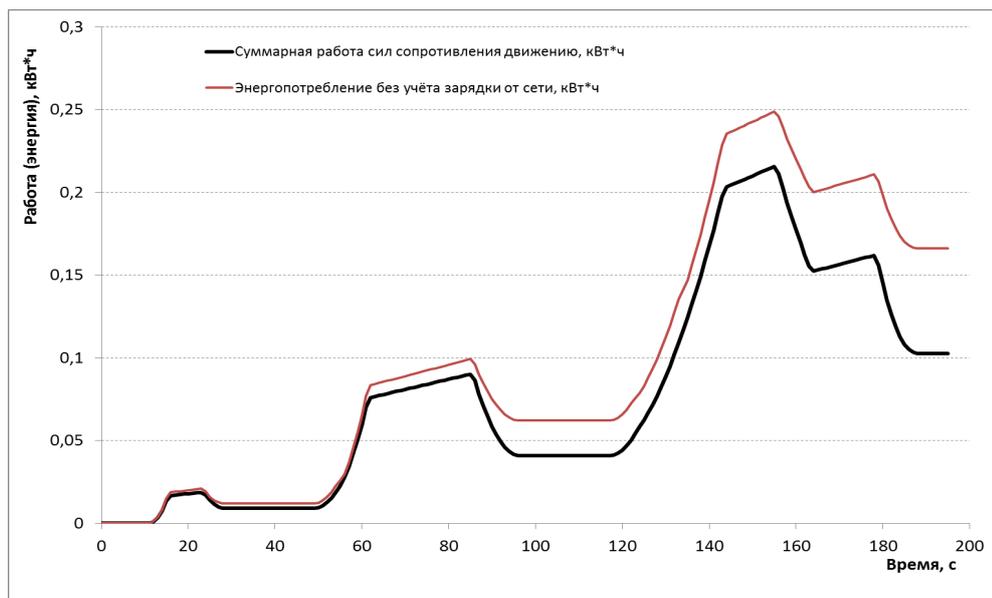


Рисунок 2.3 – График работы сил сопротивления движению и энергопотребление автомобиля Tesla Model 3 Long Range в европейском городском ездовом цикле

Итоговое значение энергопотребления вычисляется как сумма энергозатрат на каждом этапе ездового цикла, деленная на КПД АКБ в режиме разряд/заряд.

Любой электромобиль расходует тем больше энергии, чем выше скорость и быстрее ускорение, поэтому значение энергопотребления со временем начинают увеличиваться быстрее суммарной работы сил сопротивления, даже при условии того, что в расчете энергопотребления учитывается КПД узлов участвующих в передаче энергии от батареи к колесам.

2.2 Авторская структура транспортного потока по типу АТС

Для разработки авторской структуры транспортного потока по типу АТС были проведены расчеты удельного энергопотребления нескольких наиболее используемых расчетных модельных групп. Расчеты проводились с использованием исходных данных, полученных в 2022 году при натурном обследовании транспортного потока на Кутузовском проспекте в г. Москве (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – Структура транспортного потока по типу АТС на городской автомагистрали, натурный эксперимент (Кутузовский проспект, Москва) (МАДИ, 2022 год)

№	Категория транспортных средств	Суточная интенсивность, авт/сут
1	Легковые	201063
2	Автофургоны массой до 3,5 т	17113
3	Микроавтобусы массой до 3,5 т	8814
4	Грузовые массой от 3,5 до 12 т	1221
5	Грузовые массой свыше 12 т	709
6	Автобусы массой свыше 3,5 т	955

Рассматриваемые варианты структуры (расчетные модельные группы) транспортного потока указаны в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Рассматриваемые варианты структуры (расчетные модельные группы) транспортного потока

Вариант структуры	Структура	Источник
1	Легковые, Автофургоны массой до 3,5 т, Микроавтобусы массой до 3,5 т, Грузовые массой от 3,5 до 12 т, Грузовые массой свыше 12 т, Автобусы массой свыше 3,5 т	[60]
2	M1, M2, M3, N1, N2, N3	[52]
3	Passenger Cars: Mini, Small, Medium, Large; LCV: Бензиновые, Дизельные; HDT: Бензиновые >3.5 т, R/A <7.5 т, R/A >7.5 т > 12 т, R/A >12 т > 14 т, R/A >14 т > 20 т, R/A >20 т > 26 т, R/A >26 т > 28 т, R/A >28 т > 32 т, R/A > 32 т Buses: Urban Midi, U/C Standard, U/C Articulated	[18]
4	1 категория: ТС с высотой не более 2 метров с 2 и более осями; 2 категория: ТС с высотой от 2 до 2,6 метров с 2 и более осями; 3 категория: ТС с высотой от 2,6 метров и более с 2 осями 4 категория: ТС с высотой от 2,6 метров и более с 3 и более осями	[66]
5	Легковые, Грузовые, Автобусы	Обобщенная структура

Следует отметить, что каждый из указанных выше вариантов структур был сформирован под решение определенных задач организации дорожного движения, оценки загрязнения атмосферного воздуха и др.

При этом не проводились исследования оценки влияния разных классификаций [17] (структурирования - количества модельных групп АТС) автомобильных парков или транспортных потоков на достоверность определения удельного (на единицу пути) расхода топлива транспортным потоком.

Расчет энергопотребления транспортными потоками произведен далее с помощью разработанной методики оценки удельного расхода топлива (электроэнергии) одиночных ТС, описанной в главе 2.1.

Результаты распределения транспортного потока по модельным группам, указанным в таблице 2.6, модели АТС, принятые за эталонные транспортные средства, их удельные расходы топлива, энергопотребление транспортным потоком приведены в таблицах 2.8 – 2.12.

Таблица 2.8 – Эталонные ТС в рассматриваемых модельных группах по варианту структуры 1, удельный расход топлива (энергопотребление) транспортным потоком

№	Категория транспортных средств	Суточная интенсивность, авт/сут	Модель эталонного ТС	Расход топлива, л/100км
1	Легковые	201063	Toyota RAV4	10,35
2	Автофургоны массой до 3,5 т	17113	ГАЗель NEXT	14,02
3	Микроавтобусы массой до 3,5 т	8814	Volkswagen Multivan	9,50
4	Грузовые массой от 3,5 до 12 т	1221	Man LE 8.180	16
5	Грузовые массой свыше 12 т	709	КамАЗ 65117	25,3
6	Автобусы массой свыше 3,5 т	955	ЛиАЗ 5292.65	28,6
Удельное энергопотребление транспортным потоком, л/км				2 469

Таблица 2.9 – Эталонные ТС в рассматриваемых модельных группах по варианту структуры 2, удельный расход топлива и энергопотребление транспортным потоком

Класс АТС	Суточная интенсивность, авт/сут	Модель эталонного ТС	Расход топлива, л/100км
M1	209877	Toyota RAV4	10,35
M2	287	Iveco Daily 50C15	11,7
M3	668	ЛиАЗ 5292.65	28,6
N1	17113	ГАЗель NEXT	14,02
N2	1221	MAN LE 8.180	16
N3	709	КамАЗ 65117	25,3
Удельное энергопотребление транспортным потоком, л/км			2 472

Примечание: в M1 включены легковые автомобили и микроавтобусы, автобусы разделены на два класса - M2 и M3 в отношении 30/70 (в соответствии с натурными замерами)

Таблица 2.10 – Эталонные ТС в рассматриваемых модельных группах по варианту структуры 3, удельный расход топлива и энергопотребление транспортным потоком

Тип АТС	Класс АТС	Суточная интенсивность, авт/сут	Модель эталонного ТС	Расход топлива, л/100км
Passenger Cars	Mini	1196	Daewoo Matiz	5,62
	Small	19899	Nissan Note	7,67
	Medium	107522	Hyundai Creta	9,04
	Large	72446	KIA Sorento	13,7
LCV	Бензиновые	9831	ГАЗ Соболь 2752	14,13
	Дизельные	16096	ГАЗель NEXT	14,02
HDT	Бензиновые >3.5 т	286	JAC N90	15,78
	R/A <7.5 т	330	MAN LE 8.180	16

Продолжение таблицы 2.10

	R/A >7.5 т > 12 т	253	ГАЗель NEXT	16,1
	R/A >12 т > 14 т	41	JAC N120	17
	R/A >14 т > 20 т	603	JAC N200	19,6
	R/A >20 т > 26 т	428	КамАЗ 65117	25,3
	R/A >26 т > 28 т	40	MAN TGS 28.440	25,5
	R/A >28 т > 32 т	44	DAF XF	29,6
	R/A > 32 т	194	MAN TGX 41.640	28,2
Buses	Urban Midi	227	Iveco Daily 50C15	11,7
	U/C Standard	216	ЛиАЗ 5292	28,6
	U/C Articulated	227	ЛиАЗ-6213	37,7
	Удельное энергопотребление транспортным потоком, л/км			2 550

Примечание: распределение по отдельным категориям проводилась по данным Аналитического агентства «Автостат» за 2020 год в городе Москве.

Таблица 2.11 – Эталонные ТС в рассматриваемых модельных группах по варианту структуры 4, удельный расход топлива и энергопотребление транспортным потоком

Категории АТС	Суточная интенсивность, авт/сут	Модель эталонного ТС	Расход топлива, л/100км
1	201063	Toyota RAV4	10,35
2	25927	ГАЗель NEXT	14,02
3	1508	MAN LE 8.180	16
4	709	КамАЗ 65117	25,3
	668	ЛиАЗ 5292.65	28,6
Удельное энергопотребление транспортным потоком, л/км			2 505

Таблица 2.12 – Эталонные ТС в рассматриваемых модельных группах по варианту структуры 5, удельный расход топлива и энергопотребление транспортным потоком

Категория АТС	Суточная интенсивность, авт/сут	Модель эталонного ТС	Расход топлива, л/100км
Легковые	226990	Toyota RAV4	10,35
Грузовые	1930	MAN LE 8.180	16
Автобусы	955	ЛиАЗ 5292.65	28,6
Удельное энергопотребление транспортным потоком, л/км			2 407

На основании анализа значений удельной энергоэффективности транспортных потоков по вариантам, рассмотренных пяти структур по типу АТС (таблицы 2.8 – 2.12) можно сделать следующий вывод: при увеличении детализации структуры одного и того же транспортного потока увеличивается значение удельного расхода топлива транспортным потоком. При этом значение удельного расхода топлива транспортным потоком, разбитым на 18

групп АТС (вариант 3) только на 5,6% отличается от значения удельного расхода топлива транспортным потоком, состоящим из 3-х групп АТС по типу (вариант 5).

Наибольшее влияние на значение удельного расхода топлива транспортным потоком оказывают легковые автомобили. Из-за преобладающей доли в транспортном потоке легковых автомобилей целесообразно разбить эту группу на несколько подгрупп.

На основании проведенного анализа, принято решение взять за основу структуру АТС, приведенную в распоряжении Росприроднадзора от 01.11.2013 № 6-р, для формирования которой можно использовать данные статотчетности, приведенные в форме №1-БДД, которая находится в открытом доступе.

Для легковых автомобилей (категория М1) принято решение использовать классификацию, принятую в программном обеспечении COPERT. Для этого варианта структуры транспортного потока также произведена оценка удельного расхода топлива, значение которого приведено в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Авторская структура транспортного потока и результаты оценки удельного расхода топлива этим потоком

Класс АТС	Суточная интенсивность, авт/сут	Модель эталонного ТС	Расход топлива, л/100км
Mini	1248	Daewoo Matiz	5,62
Small	20771	Nissan Note	7,67
Medium	112235	Hyundai Creta	9,04
Large	75622	KIA Sorento	13,7
M2	287	Iveco Daily 50C15	11,7
M3	668	ЛиАЗ 5292.65	28,6
N1	17113	ГАЗель NEXT	14,02
N2	1221	MAN LE 8.180	16
N3	709	КамАЗ 65117	25,3
Удельное энергопотребление транспортным потоком, л/км			2 516

Удельное энергопотребление транспортным потоком авторской структуры незначительно отличается от значения по структуре COPERT, однако она компактнее и удобнее.

На фоне стремительного роста численности электромобилей в автомобильном парке в его структуру принято решение добавить легковые, грузовые электромобили и электробусы. Также представляется целесообразным добавить троллейбусы и трамваи, которые зачастую входят в состав транспортного потока в крупных городах. Итоговая авторская структура транспортного потока представлена в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Авторская структура транспортного потока, предложенная автором и используемая в методике

№ п/п	Класс АТС	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

Каждая группа транспортных средств может быть разделена по виду топлива (бензин, дизельное топливо, КПП, СПГ, СУГ, электротяга).

2.3 Оценка энергопотребления транспортным потоком

Выполнение оценки энергопотребления транспортным потоком предполагает:

- сбор необходимых исходных данных, таких как структура, интенсивность, скорость транспортного потока, длина рассматриваемого участка УДС, цикл движения ТС;
- проведение расчета энергопотребления одиночным транспортным средством по разработанным на предыдущих этапах данной работы методикам в цикле WLTP, называемого эталонным. Эталонное ТС – наиболее часто встречающееся транспортное средство в выбранной расчетной модельной группе;
- проведение расчета энергопотребления одиночного транспортного средства в заданном цикле. Цикл движения задается средней скоростью транспортного потока.
- проведение расчета энергопотребления расчетной модельной группой транспортных средств, путем умножения результата энергопотребления (расхода топлива) эталонного ТС на общее количество ТС в группе;
- проведение расчета энергопотребления транспортного потока в целом путем суммирования значений энергопотребления (расхода топлива) всеми расчетными модельными группами.

Принципиальная схема методики приведена на рисунке 2.4.

Методика позволяет рассчитать энергопотребление (удельный расход топлива разного вида) транспортного потока как на отдельном участке, так и всей улично-дорожной сети с достаточно высокой точностью за счет использования детальной классификации транспортных средств, возможностью менять марочный состав эталонных транспортных средств.

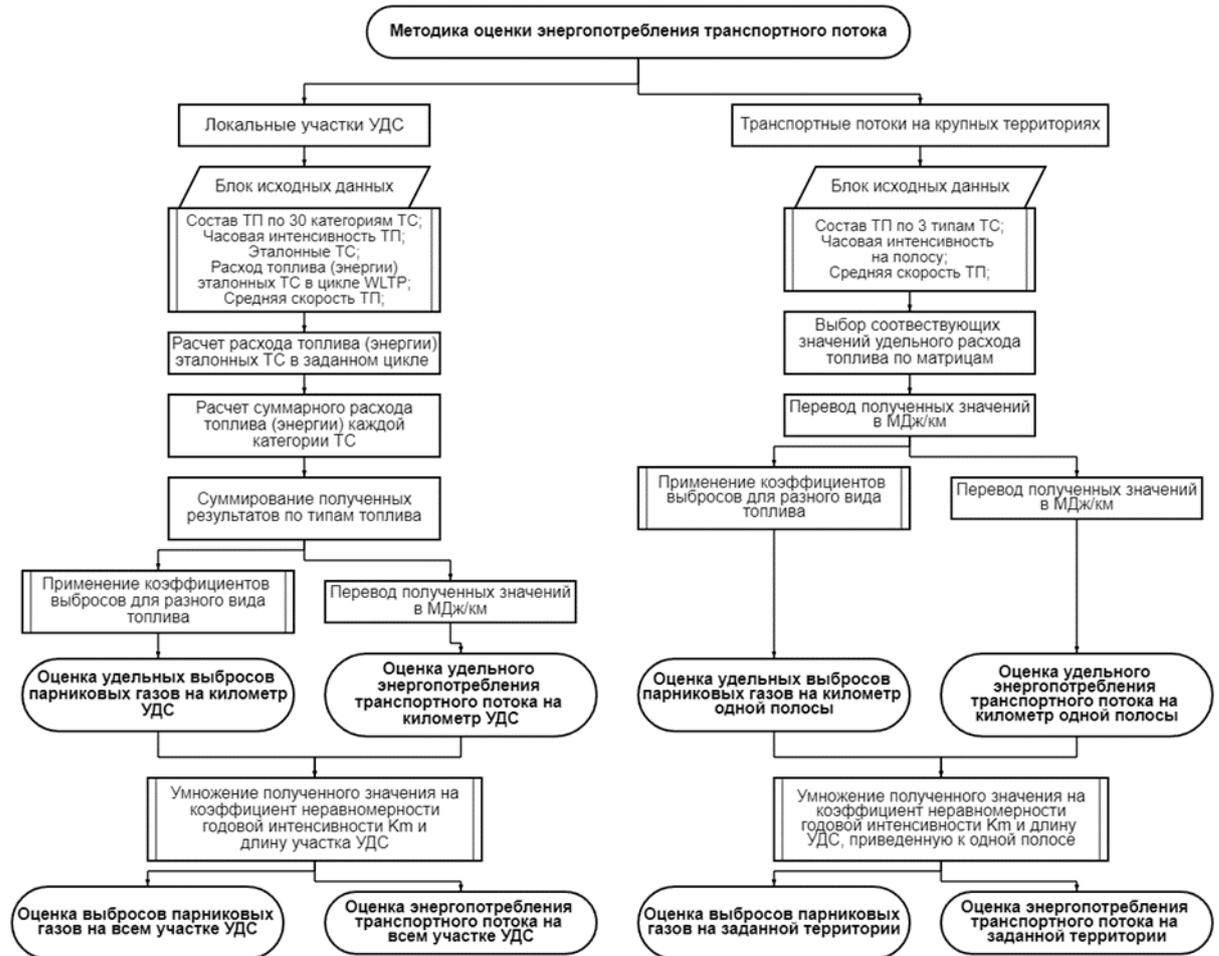


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема методики оценки энергопотребления транспортным потоком

Детализированная версия методики

Методика предусматривает оценку 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 (QЦ, л/100 км) по формуле:

$$Q_{i \text{ категории.}} = \sum (Q_{\text{Ц}} \times I_i) / 100, \text{ л/км} \quad (2.15)$$

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 АТС i -ого типа.

Для получения удельного расхода топлива эталонного транспортного средства в произвольном цикле движения необходимо к удельному расходу $Q_{ц}$ применить повышающий/понижающий коэффициент $k_1 - k_3$.

Для установления понижающих и повышающих коэффициентов цикл WLTP был разложен на фазы (Low, Medium, High, Extra High). Процедура испытания по всемирно согласованному циклу разделена на 3 класса в зависимости от типа испытуемого транспортного средства [24]. Для каждого класса были установлены зависимости средней скорости от расхода топлива транспортным потоком.

С помощью полученных зависимостей можно установить значения понижающих и повышающих коэффициентов определения транспортного потока с привязкой к режимам движения в цикле WLTP.

В качестве удельного (на единицу пути) расхода топлива АТС принимается значение расхода топлива в цикле WLTP, что отмечено пунктирной линией зеленого цвета на графиках (рисунок 2.5).

Значение удельного расхода топлива в цикле WLTP принимается за единицу; для установления значения удельного расхода топлива на других скоростях движения АТС применяется понижающий или повышающий коэффициент, в соответствии с графиками.

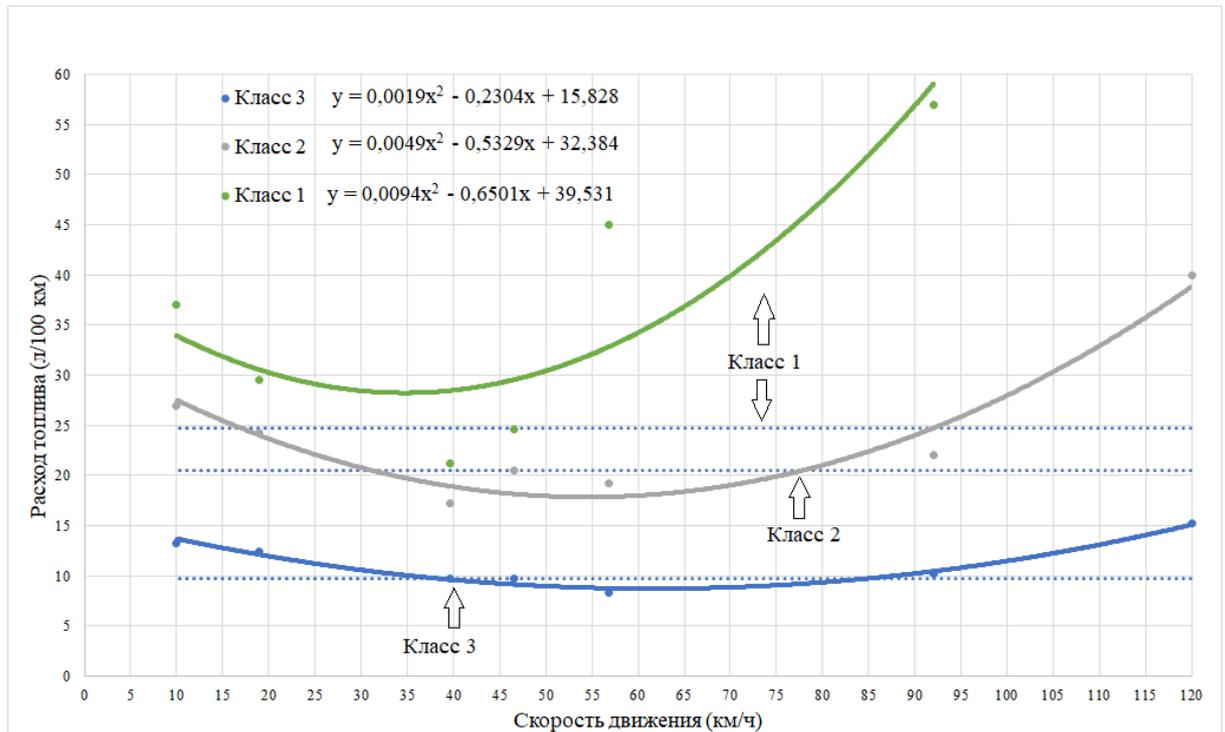


Рисунок 2.5 – Зависимость среднего расхода топлива транспортного потока (л/100км) от средней скорости движения (км/ч)

Значения коэффициентов для всех классов WLTP приведены в таблице 2.15; жирным шрифтом выделены значения в цикле WLTP, установленных для разных фаз с соответствующими значениями коэффициентов для разных типов АТС в этих фазах.

Формула для определения энергопотребления транспортным потоком имеет вид:

$$Q_{\text{ТП}} = Q_{\text{Л}} + Q_{\text{ЛКА}} + Q_{\text{ГА}}, \text{ л/км} \quad (2.16)$$

где $Q_{\text{Л}}$ – расход топлива легковых транспортных средств при заданной скорости, интенсивности и составе потока, л/км; $Q_{\text{ЛКА}}$ – расход топлива легких коммерческих транспортных средств при заданной скорости, интенсивности и составе потока, л/км; $Q_{\text{ГА}}$ – расход топлива грузовых автомобилей и автобусов при заданной скорости, интенсивности и составе потока, л/км.

Таблица 2.15 – Значения повышающих/понижающих коэффициентов $k_1 - k_3$

Коэффициент	k_3	k_2	k_1
Средняя скорость ТП, км/ч	Класс 3 WLTP	Класс 2 WLTP	Класс 1 WLTP
10	1,45	1,38	1,62
15	1,33	1,32	1,42
20	1,25	1,2	1,22
25	1,19	1,15	1,02
26	-	-	1
30	1,14	1,1	0,82
35	1,1	1,02	0,76
36,25	-	1	-
40	1	0,97	0,78
45	0,95	0,95	0,94
46	0,93	-	1
50	0,91	0,92	1,23
55	0,88	0,9	1,48
60	0,83	0,88	1,71
65	0,81	0,89	1,86
70	0,82	0,91	2,01
75	0,83	0,93	2,16
80	0,85	0,97	2,31
85	0,94	1	2,46
90	1	1,05	2,61
95	1,08	1,15	2,76
100	1,13	1,32	2,91
105	1,22	1,45	3
110	1,29	1,59	3,15
115	1,4	1,74	3,3
120	1,53	1,9	3,5

Оценка прямых удельных выбросов ПГ транспортным потоком проводится по формуле:

$$E_{\text{п}} = \sum_a (AD_a \times EF_a), \text{ кг/км} \quad (2.17)$$

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. (таблица 2.16).

Таблица 2.16 – Коэффициенты выбросов (EF) для разных видов топлива⁴

Вид топлива	Коэффициент выбросов (EF)		
	кг CO ₂ /л	кг CH ₄ /л	кг N ₂ O/л
Бензин	2,22	0,0011	0,0001
Дизельное топливо	2,71	0,00014	0,00014
СУГ (пропан)	1,53	0,0015	0,0000048
КПГ	1,23	0,0021	0,000067
СПГ	1,15	0,0019	0,000063

При оценке выбросов ПГ необходимо определять выбросы не только CO₂, но и CH₄ и N₂O. Коэффициенты приведения: CO_{2-экв} = CO₂: CH₄: N₂O = 1: 25: 298 (ГЭФ, РКИК ООН).

Удельное энергопотребление транспортного потока представляется в МДж/км, необходимые коэффициенты перевода указаны в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – Коэффициенты перевода из литров в МДж различных видов топлива

Вид топлива	МДж/л
Бензин	32,99
Дизельное топливо (ДТ)	36,13
Сжиженный природный газ (СПГ)	24,75
Компримированный природный газ (КПГ)	23,66
Сжиженный углеводородный газ (СУГ)	25,46

Для перехода от часовой интенсивности к суточной используется формула:

$$N_{\text{сут}} = \frac{N_{\text{час}}}{C_{\text{час}}}, \text{ авт/сут} \quad (2.18)$$

где $N_{\text{час}}$ – часовая интенсивность транспортного потока (в т.ч. и интенсивность на полосу), авт/час; $C_{\text{час}}$ – постоянный коэффициент перевода равный 0,152.

Для перехода от суточной интенсивности к годовой можно просто умножить значение суточной интенсивности на 365 (количество дней в году), однако учитывая неравномерность движения транспортных средств в течение года выведен коэффициент 312. Таким образом, для перехода от суточной интенсивности к годовой необходимо использовать формулу:

⁴ Приказ Минприроды России от 30.06.2015 N 300 Об утверждении методических указаний и руководства по количественному определению объема выбросов парниковых газов организациями, осуществляющими хозяйственную и иную деятельность в Российской Федерации

$$N_{\text{год}} = N_{\text{сут}} \times C_{\text{год}}, \text{ авт/год} \quad (2.19)$$

где $N_{\text{сут}}$ – суточная интенсивность транспортного потока, авт/сут; $C_{\text{год}}$ – постоянный коэффициент перевода равный 312 (учитывает неравномерность движения транспортных потоков на протяжении года).

Таким образом возможен пересчет из часовой интенсивности в годовую, путем умножения часовой интенсивности на коэффициент K_M равный 2053.

После расчета энергопотребления транспортного потока и перевода значения в МДж/км, можно рассчитать энергопотребление транспортного потока на всей длине участка УДС за год по формуле:

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{ТП}} \times L \times K_M, \text{ МДж/год} \quad (2.20)$$

где $Q_{\text{ТП}}$ – энергопотребление транспортного потока МДж/км*час; L – длина участка УДС, км; K_M – коэффициент перевода часовой/суточной интенсивности в годовую.

По этой же формуле можно произвести пересчет прямых и косвенных выбросов парниковых газов из $\text{кгСО}_2\text{-экв/км}$ в $\text{кгСО}_2\text{-экв/год}$ [51].

Для расчета больших площадей по матрицам значений требуется вместо длины участка УДС брать протяженность УДС на рассматриваемой площади.

Для учета расхода электроэнергии таких электрических транспортных средств как троллейбус и трамвай необходимо использовать методику, утвержденную Распоряжением Министерства транспорта Российской Федерации от 18 апреля 2013 г. НА-37-р «О введении в действие методических рекомендаций по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования».

Согласно приведенной методики величину удельного расхода электроэнергии без учета потерь по типам (моделям) подвижного состава трамваев (троллейбусов) рассчитывают по формуле:

$$H_{\text{пi}} = (H_{\text{T}} + H_{\text{В}}) \times G_{\text{ср}}, \text{ кВт*ч/км} \quad (2.21)$$

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

Электротранспорт не производит прямых выбросов парниковых газов, в виду отсутствия отработавших газов ДВС. В таком случае принято рассматривать косвенные выбросы парниковых газов при производстве электроэнергии, которая потребляется тяговыми электромоторами электрических ТС.

Косвенные выбросы от использования АТС с тяговым электроприводом рассчитываются через пробег различных типов электрических транспортных средств по методике МАДИ.

Косвенные выбросы от электротранспорта рассчитываются по формуле [15]:

$$E_k = \sum_i (ED_i \times B_{ээ}), \text{ г/км} \quad (2.22)$$

где i – тип автомобиля (легковой, грузовой, автобус); ED_i – удельный расход электроэнергии i -ым типом автомобиля, кВт*ч/км; $B_{ээ}$ – коэффициент выбросов CO₂ при производстве энергии, г/кВтч.

Коэффициент выбросов CO₂ при производстве энергии можно найти на официальном сайте АО «АТС»⁵. На сайте приводится как среднее значение, так и значения по регионам и конкретным датам.

В формуле 2.22 могут быть учтены КПД зарядки автомобиля и потери электроэнергии при передаче от источника до тягового аккумулятора. По данным исследований [29], потери электроэнергии при передаче от источника до тягового аккумулятора составляют примерно 10-15%. Рассмотрение жизненного цикла [48] автомобиля достаточно объемная

⁵ Коэффициент выбросов парниковых газов энергосистемы России | АО "АТС" – URL: <https://www.atsenergo.ru/results/co2map?>

задача, требующая отдельного, более детального исследования, не предусмотренного в данной диссертации.

Прогноз выбросов CO_2 (г/кВт*ч) с учетом возможного изменения структуры энергосистемы РФ представлен на рисунке 2.6.

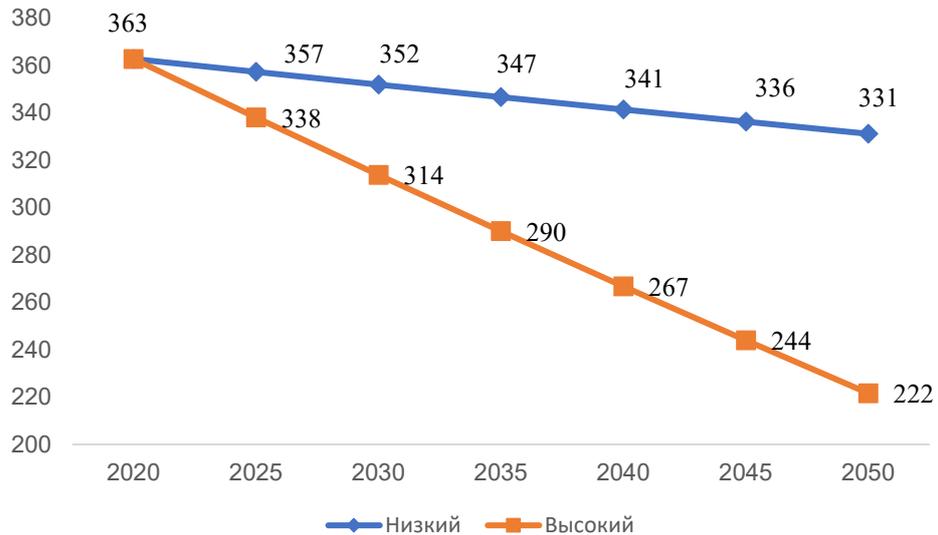


Рисунок 2.6 – Изменение выбросов CO_2 (г/кВтч) с учетом возможного изменения структуры энергосистемы РФ [20]

Математическая обработка данных, относящихся к косвенным выбросам парниковых газов (ПГ), выполняется по аналогичной с прямыми выбросами методологии.

Методика позволяет получить значения как удельных (на километр пробега) выбросов ПГ ($\text{гCO}_2\text{-экв/км}$) и энергопотребления (МДж/км), так и валовых выбросов ($\text{тCO}_2\text{-экв/год}$) и энергопотребления (МДж/год) всего транспортного потока, а также отдельных групп транспортных средств, согласно принятой классификации.

Для подтверждения соответствия различных объектов транспортной инфраструктуры критериям «зеленого проекта» по Постановлению Правительства РФ от 21 сентября 2021 г. N 1587 (с изменениями и

дополнениями от 11 марта 2023 г.)⁶ – снижение выбросов парниковых газов в CO₂-экв на тонно-километр или пассажиро-километр более, чем на 20% по сравнению с парниковыми выбросами альтернативных объектов транспортной инфраструктуры, необходимо перейти к удельным выбросам (на единицу транспортной работы).

Для перехода от прямых выбросов (кгCO_{2-экв}/км*час) *i*-ой группы АТС к удельным (на единицу транспортной работы) выбросам (кгCO_{2-экв}/пасс*км и кгCO_{2-экв}/т*км) необходимо воспользоваться формулой:

$$E_{уд} = \frac{\sum E_{п}}{\sum A_{час}}, \text{ кгCO}_{2-экв}/\text{пасс*км} \text{ или } \text{ кгCO}_{2-экв}/\text{т*км} \quad (2.23)$$

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

$$A_{час} = n_{час} \times L \times p, \text{ пасс*км} \text{ или } \text{ т*км} \quad (2.24)$$

где $n_{час}$ – интенсивность выбранной категории АТС в транспортном потоке, авт/час; L – длина участка, км; p – коэффициент загрузки транспортного средства (число находящихся в АТС пассажиров или масса перевозимого груза), подробнее в главе 3.

Для перехода от прямых валовых выбросов (тCO_{2-экв}/год) *i*-ой группы АТС к удельным (на единицу транспортной работы) валовым выбросам (тCO_{2-экв}/пасс*год и тCO_{2-экв}/т*год) необходимо в формулу 2.16 подставить валовые выбросы и годовую транспортную работу.

Инженерная версия методики

При решении практических задач на уровне дорожной или улично-дорожной сети города или региона в данной методике разработаны матрицы значений удельного расхода топлива транспортного потока для типичного состава потока по виду топлива, интенсивности движения на одну полосу и средней скорости транспортного потока.

⁶ Постановление Правительства РФ от 11.03.2023 N 373 "О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 21.09.2021 N 1587" | ГАРАНТ https://base.garant.ru/406528659/#block_1001

Диапазоны изменения данных показателей транспортного потока приведены в таблице 2.18.

Таблица 2.18 – Основные изменяемые показатели при формировании расчетных матриц значений удельного расхода разных видов моторного топлива в зависимости от интенсивности, скорости, состава транспортного потока

Группа ТС	Обозначение	Диапазон и шаг состава потока, %	Диапазон и шаг интенсивности движения на полосу, АТС/час	Диапазон и шаг средней скорости движения, км/ч	Доли бензиновых и дизельных ТС в транспортном потоке
Легковые	Л	0-100 шаг 5	200-2200 шаг 200	10-100 шаг 10	0,90:0,10
Легкие коммерческие автомобили	ЛКА				0,20:0,80
Грузовые автомобили и автобусы	ГА				0,10:0,90

Фрагмент матрицы значений удельного расхода топлива (л/км) легковых АТС 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 2.19.

Дальнейшие преобразования данных, полученных с использованием инженерной версии методики идентичны детализированной версии методики.

Представляется, что подобный инженерный подход может дать необходимое понимание об энергопотреблении транспортных средств, движущихся на транспортной сети.

Таблица 2.19 – Фрагмент матрицы значений удельного расхода топлива (л/км*час) АТС 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		

Выводы по главе 2:

— Разработана комплексная методика оценки энергопотребления и выбросов парниковых газов, которая охватывает весь спектр колесных транспортных средств — от одиночных автомобилей до транспортных потоков на городской улично-дорожной сети. Методика интегрирует в себе как усовершенствованные эмпирические модели, так и фундаментальные подходы, основанные на решении уравнения тягового баланса. Методика имеет два уровня: детализированный и инженерный.

— Для одиночных ТС полной массой до 3,5 т предложен и апробирован комплексный показатель (К), позволяющий с высокой достоверностью (коэффициент детерминации 0.81–0.97) оценивать базовый расход топлива или энергии на основе ключевых конструктивных параметров (снаряженная масса, рабочий объем двигателя, фактор обтекаемости). Установлены регрессионные зависимости для автомобилей с ДВС и электромобилей.

— Для тяжелых ТС (полной массой > 3,5 т) применен альтернативный подход, использующий данные международной базы MARLIS (HBEFA) о пробеговых выбросах загрязняющих веществ. На его основе по методу

углеродного баланса получены значения расхода топлива для грузовиков и автобусов различных категорий и экологических классов.

— Предложена и обоснована авторская структура транспортного потока, состоящая из 14 групп. Она сочетает в себе детализацию, необходимую для точности расчетов (включая разделение легковых автомобилей на 4 класса по COPERT и выделение электромобилей), и компактность, удобную для практического применения. Показано, что увеличение детализации сверх этого уровня не дает значительного прироста точности.

— Детализированная версия методики позволяет переходить от лабораторных условий (цикл WLTP) к реальным условиям эксплуатации благодаря введению системы поправочных коэффициентов (k_1 – k_3), которые учитывают зависимость расхода топлива от средней скорости движения транспортного потока.

— Методика обеспечивает расчет как удельных (на километр пробега), так и валовых (годовых) показателей энергопотребления (в МДж), расхода топлива (в литрах), расхода электроэнергии (в кВт*ч) и выбросов парниковых газов (прямых и косвенных, в тоннах $\text{CO}_2\text{-экв.}$). Это позволяет оценивать воздействие транспорта на окружающую среду на уровне отдельного участка дороги, маршрута или всей городской сети.

— Методика адаптирована для решения прикладных задач, в том числе для подтверждения соответствия проектов критериям «зеленого финансирования». Для этого предусмотрен переход от валовых выбросов к удельному показателю на единицу транспортной работы (пассажиро-километр или тонно-километр).

— Разработанная методика представляет собой универсальный, научно обоснованный и практико-ориентированный инструмент для оценки и управления энерго-экологической эффективностью транспортных систем крупных городов, что создает основу для разработки и обоснования конкретных мероприятий, представленных в последующих главах.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА В КРУПНОМ ГОРОДЕ

Для определения основных показателей транспортного потока необходимо было провести натурное обследование на Кутузовском проспекте города Москвы. Помимо определения состава потока, интенсивности и средней скорости необходимо было определить коэффициент загрузки транспортного средства, для расчета транспортной работы. Такой коэффициент достаточно трудно найти в открытых источниках, кроме того, местные условия вождения, состояние УДС и прочие факторы оказывают значительное влияние на значение коэффициента.

Обследование включало выезд на место, составление маршрутов обследования, опробование видеоаппаратуры, наблюдение за характеристиками транспортных потоков в выходные и рабочие дни, занесение результатов обследования в базу данных в соответствии с требованиями ГОСТ 56162-2019 (раздел 6 и приложение А) и приказа МПР от 27.11.2019 № 804 «Об утверждении методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 24.12.2019 N 56957) (раздел II, пункты 4-22), камеральную обработку и анализ данных.

Использование методик определения характеристик транспортных потоков и форм результатов обработки данных, приведенных в ГОСТ 56162-2019 и приказе МПР от 27.11.2019 № 804, продиктована необходимостью сохранения единого подхода сбора исходной информации по транспортным потокам, которая используется при определении выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха по отдельным парниковым газам (CH_4 , N_2O). К сожалению, методика МПР не учитывает

выбросы CO₂, а также показатели пассажирской и грузовой транспортной работы автомобилей разных типов в транспортных потоках, необходимые для оценки удельных выбросов ПГ на единицу транспортной работы.

Натурное обследование выполнялось в период с 13 по 15 мая 2022 года с использованием 2-х видеокамер [18], размещенных одновременно на обеих сторонах автомагистрали, для охвата транспортного потока, движущегося в обоих направлениях.

Натурное обследование производилось в утренний и вечерний часы пик буднего дня, в ночное время, и в утренний и вечерние часы пик выходного дня, в следующие временные промежутки:

- Пятница 13.05.2022 г. – 08:00 – 11:00; 18:00-22:00;
- Суббота 14.05.2022 г. – 02:00 – 04:00; 08:00 – 11:00; 18:00-22:00;
- Воскресенье 15.05.2022 г. – 08:00 – 11:00; 18:00-22:00;
- Понедельник 16.05.2022 г. – 02:00 – 04:00; 08:00 – 11:00; 18:00-22:00;

Общий объем видеoinформации с результатами обследования трафика на участках Кутузовского проспекта составил более 210 ГБ.

По результатам видеонаблюдения было установлено, что на Кутузовском проспекте отмечается оживленное движение маршрутных автобусов, больше половины из которых прибывает в Москву из Подмосковья. Данные по интенсивности маршрутных городских и пригородных автобусов на Кутузовском проспекте уточнялись на основании анализа и обобщения информации с официального сайта Департамент транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры города Москвы ⁷, включающей:

- анализ расписания всех маршрутов;
- оценку количества проездов одного автобуса по маршруту за день и количество автобусов на линии;
- длину маршрута проходящего по объекту исследования;

⁷ <https://transport.mos.ru/transport/schedule>

- характеристики подвижного состава автобусного парка городского и пригородного транспорта, в том числе пассажироместимость автобусов.

Анализ расписания маршрутов городских и пригородных автобусов на Кутузовском проспекте позволил оценить, как часто автобусы приезжают на остановки, и какое время занимает полный круг по маршруту у одного автобуса. Исходя из этих данных установлено количество автобусов на маршруте в сутки и количество проездов одного автобуса по маршруту. Результаты анализа расписания автобусных маршрутов на Кутузовском проспекте представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Сводная таблица анализа расписания автобусных маршрутов на Кутузовском проспекте

№ Маршрута	Время в пути	Полное время круга	Количество автобусов на маршруте		Количество проездов одного автобуса по маршруту	
			Будни	Выходные	Будни	Выходные
					Суммарно	Суммарно
45	0:44	1:28	5	3	18	19
103	0:43	1:26	6	4	21	19
104	1:15	2:30	5	5	10	14
116	0:45	1:30	6	5	11	23
139	-	-	16	14	10	10
157	0:40	1:20	10	4	20	31
157к	0:21	0:42	3	2	29	30
190	0:30	1:00	5	3	25	31
198	0:33	1:06	2	3	15	11
205	1:03	2:06	7	7	6	5
231	0:29	0:58	5	4	30	28
239	0:46	1:32	7	5	23	30
297	0:53	1:46	8	7	17	18
301	1:40	3:20	3	3	2	2
339	1:12	2:24	19	15	14	13
442	0:40	1:20	10	5	8	13
454	1:00	2:00	14	12	12	12
457	-	-	3	3	2	2
474	0:30	1:00	5	3	26	33
477	1:00	2:00	4	4	6	6
609	0:38	1:16	4	2	7	11
610	0:43	1:26	12	6	16	21
612	0:45	1:30	5	3	12	19
622	0:51	1:42	8	5	17	22
732	0:56	1:52	6	5	16	18
779	1:50	3:40	4	-	11	0
818	1:18	2:36	26	24	13	8
840	0:45	1:30	9	5	18	19
т39к	0:27	0:54	4	4	27	29
т34	1:52	3:44	22	14	9	11
м7	0:54	1:48	13	12	18	19
м2	1:04	2:08	16	15	15	15
н2	0:36	1:12	2	2	11	11

При анализе характеристик городских и пригородных автобусов была использована информация из открытых источников о моделях автобусов, состоящих в разных автобусных парках Москвы и Подмосковья, необходимых для оценки пассажирооборота. При распределении автобусов той или иной модели по маршрутам, использовались данные, полученные с официального сайта ГУП «Мосгортранс». С использованием характеристик автобусов определено количество сидячих мест и номинальная загрузка, что представлено в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Таблица распределения автобусов по маршрутам на Кутузовском проспекте и их пассажироместимость, чел.

№ Маршрута	Тип ТС	Модель	Номинальная загрузка	Количество сидячих мест
45	Автобус	ЛиАЗ-5292	87	28
103	Автобус	Mercedes-Benz O345	75	22
104	Автобус	ЛиАЗ-6213	115	33
116	Автобус	ЛиАЗ-5265	80	23
139	Автобус	ЛиАЗ 5292.65-03	42	42
157	Автобус	ЛиАЗ-6213	115	33
157к	Автобус	ЛиАЗ-5292	87	28
190	Автобус	ЛиАЗ-5292	87	28
198	Автобус	ЛиАЗ-6213	115	33
205	Электробус	КАМАЗ-6282	50	33
231	Электробус	КАМАЗ-6282	50	33
239	Электробус	КАМАЗ-6282	50	33
297	Электробус	КАМАЗ-6282	50	33
301	Автобус	ЛиАЗ 5292.65-03	42	42
339	Автобус	ЛиАЗ-6213	115	33
442	Автобус	ЛиАЗ-4292.60	68	23
454	Автобус	Волжанин 6270.10	115	31
457	Автобус	ЛиАЗ 5292.65-03	42	42
474	Автобус	ЛиАЗ-5292	87	28
477	Автобус	ЛиАЗ-4292.60	68	23
609	Автобус	ЛиАЗ-5265	80	23
610	Автобус	ЛиАЗ-5292	87	28
612	Автобус	ЛиАЗ-5292	87	28
622	Электробус	КАМАЗ-6282	50	33
732	Автобус	Mercedes-Benz O345	75	22
779	Автобус	ЛиАЗ-5265	80	23
818	Автобус	ЛиАЗ-4292.60	68	23
840	Автобус	Mercedes-Benz O345	75	22
т39к	Автобус	ЛиАЗ-5292	87	28
т34	Электробус	КАМАЗ-6282	50	33
м7	Автобус	ЛиАЗ-5292	87	28
м2	Автобус	Mercedes-Benz O345	75	22
н2	Автобус	ЛиАЗ-5292	87	28

Методика оценки транспортной работы на Кутузовском проспекте охватила несколько категорий транспорта: легковые автомобили (служебные и личного пользования), такси и грузовики. В рамках расчетов для пассажирских перевозок было определено среднее наполнение единицы подвижного состава, а для грузовых – средняя масса перевозимого груза. Указанные нормативы были приняты исходя из следующих соображений.

В ходе проведения эксперимента по определению характеристик транспортного потока на участках Кутузовского проспекта и дублере, было произведено разделение легковых АТС на две группы: легковые АТС и автомобили-такси. На основании ранее выполненных исследований было принято, что в единице легкового транспорта находится 1,45 пассажира. По результатам опроса водителей такси нескольких таксомоторных парков было установлено, что среднестатистическим автомобилем-такси перевозится примерно 2,3 пассажира.

Среднее количество пассажиров, перевозимое микроавтобусами массой до 3,5 т (минивэны с 7 сидячими местами), как было установлено по результатам натурных обследований, составляет 4,0 пассажира с учетом того, что часть минивэнов в будни дни используется как личный транспорт и в выходные - для поездок с семьей.

Для оценки пассажиропотока автобусов массой свыше 3,5 т была составлена сводная таблица автобусных маршрутов, проанализирован парк, определено суточное количество рейсов и численность автобусов на линии. Было принято, что загрузка автобусов в будние дни равна номинальной (5 пассажиров на квадратный метр), а в выходные дни загрузка принята по количеству сидячих мест конкретной марки маршрутного автобуса.

Анализ деятельности Филевского автобусно-троллейбусного парка (парк, обслуживающий рассматриваемые участки Кутузовского проспекта), позволил получить информацию о количестве посадочных мест автобусов, находящихся на линии.

Также в ходе обработки видеозаписей установлено, что автобусов массой свыше 3,5 т, принадлежащих частным перевозчикам примерно в 2.6 раза больше, чем муниципальных или работающих по контракту. Автобусы частных перевозчиков, хоть и разных марок, имеют одинаковое количество посадочных мест; их заполняемость в будние и выходные дни принята равной числу сидячих мест.

В таблице 3.3 приведены сводные данные по численности перевезенных пассажиров и массе перевезенных грузов на Кутузовском проспекте и его дублере единицей подвижного состава [35].

Таблица 3.3 – Численность перевезенных пассажиров и масса перевезенных грузов на Кутузовском проспекте и его дублере единицей подвижного состава, чел./тонн

Тип ТС	Количество пассажиров/ Масса груза	
Легковые и такси	Легковые, чел.	1,45
	Такси, чел.	2,3
Легкие коммерческие	Автофургоны массой до 3,5 т, тонн	2
	Микроавтобусы массой до 3,5 т, чел	4
Грузовые	Грузовые массой от 3,5 до 12 т, тонн	7,75
	Грузовые массой свыше 12 т, тонн	12
Автобусы	Массой от 3,5 до 12 т, тонн	20
	Массой свыше 12 т, чел.	50
Троллейбусы, трамваи	Одинарные	20
	Сочлененные	50

Для расчета транспортной работы по методике согласно принятой классификации в главе 2, необходимо распределить легковые автомобили на личные транспортные средства и автомобили-такси. Наиболее популярные транспортные средства, работающие в такси в Москве, относятся к категориям *medium* и *large*. Поэтому для этих категорий и целесообразно осуществить распределение.

Кутузовский проспект – крупнейшая вылетная автомагистраль города, проходящая через несколько крупных районов. Исходя из вышеизложенного, перевезенных пассажиров, массу перевезенных грузов и приведенные коэффициенты на Кутузовском проспекте, в качестве допущения, можно распространить на всю УДС города Москвы.

Численность перевезенных пассажиров, масса перевезенных грузов и приведенные коэффициенты, перенесенные на авторскую структуру транспортного потока показана в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Численность перевезенных пассажиров и масса перевезенных грузов по авторской структуре транспортного потока

№ п/п	Классификация	Тип транспортного средства	Приведенный коэффициент	Количество пассажиров/ Масса груза	
1	Mini		1	1,45 чел.	
2	Small			1,45 чел.	
3	Medium	Легковые	0,835	1,45 чел.	
		Такси	0,165	2,3 чел.	
4	Large	Легковые	0,835	1,45 чел.	
		Такси	0,165	2,3 чел.	
5	Легковые электромобили		1	1,45 чел.	
6	N1			2 т	
7	N2			7,75 т	
8	N3			12 т	
9	Грузовые электромобили			12 т	
10	M2			20 чел.	
11	M3			50 чел.	
12	Электробусы			50 чел.	
13	Троллейбусы			Одинарные	20 чел.
				Сочлененные	50 чел.
14	Трамваи			Одинарные	20 чел.
				Сочлененные	50 чел.

Выводы по главе 3:

— Проведено комплексное натурное обследование характеристик транспортного потока на вылетной автомагистрали Москвы — Кутузовском проспекте. Обследование выполнено с соблюдением требований действующих ГОСТ и методических указаний, что обеспечивает достоверность и сопоставимость полученных данных.

— Получены детализированные характеристики транспортного потока, включая его структуру, интенсивность движения в различные временные интервалы (часы пик, ночное время, будни и выходные) и средние скорости. Сбор данных осуществлялся с помощью видеорегистрации, что позволило провести последующий анализ с минимальной погрешностью полученных данных. Общий объем видео информации составил порядка 210 Гб.

— Для автобусного сообщения проведен углубленный анализ на основе открытых данных расписаний и характеристик подвижного состава. Это позволило не только учесть интенсивность движения автобусов, но и оценить их пассажироместимость и, как следствие, вклад в общий пассажиропоток на рассматриваемом объекте УДС. Количество перевозимых автобусами людей решено установить по количеству сидячих мест. Для автобусов полной массой от 3,5 до 12 т количество пассажиров принято равным 20, а для автобусов полной массой свыше 12 т – 50.

— Установлены усредненные коэффициенты загрузки для всех категорий транспортных средств, включая легковые автомобили индивидуальных владельцев, автомобилей-такси, микроавтобусы, грузовики и автобусы. Эти эмпирически полученные коэффициенты учитывают местную специфику и позволяют с высокой точностью рассчитать реальную транспортную работу, выполняемую транспортным потоком. На основании предыдущих исследований принято, что в среднем за поездку легковой автомобиль перевозит 1,45 человека. По результатам опроса таксомоторных парков, легковой автомобиль-такси за одну поездку перевозит 2,3 человека. Грузовые автомобили класса N1 за одну поездку перевозят 2 т груза, N2 – 7,75 т, а N3 – 12 т.

— Полученные данные интегрированы в разработанную в Главе 2 авторскую структуру транспортного потока. Это обеспечивает готовность методики к практическому применению для оценки энергопотребления и выбросов парниковых газов транспортным потоком на единицу транспортной работы, что особенно актуально для верификации проектов на соответствие критериям «зеленого» финансирования.

Таким образом, в результате экспериментов был получен требуемый набор верифицированных исходных данных и коэффициентов для проведения расчетов по приведенной в Главе 2 методики.

ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ И ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ТРАНСПОРТНЫМ ПОТОКОМ

Эффективность оценки влияния мероприятий по организации дорожного движения зависит от выбора пространственной модели. Известен подход по детализированной разбивке моделируемой области на множество мелких участков, описанный в пункте 1.3 настоящего диссертационного исследования, обеспечивающий высокую точность данных, но занимающий серьезное количество информационных и операционных ресурсов.

Город Москва имеет радиально-кольцевую структуру УДС; поэтому в данном исследовании разбивка территории, связанная с геометрией дорожной сети, будет производиться с учетом трех ограничений: внутри Садового кольца, между Садовым кольцом и Третьим транспортным кольцом (ТТК) и между ТТК и Московской кольцевой автомобильной дорогой (МКАД). Представляется, что такой подход позволяет сохранить адекватность модели, учитывая планировочные особенности города и одновременно оптимизировать затраты на обработку и вывод данных.

4.1 Сценарный прогноз прямых и косвенных выбросов ПГ на транспортной сети города Москвы

С использованием методики, приведенной в Главе 2, коэффициентов, полученных при натурном обследовании, описанном в Главе 3 выполнены расчеты энергопотребления, валовых и удельных (на единицу транспортной работы) выбросов ПГ транспортными потоками на УДС за 2024 год, а также согласно сценариям развития транспортной инфраструктуры в 2028-2030 гг. за счет реализации нескольких комплексных схем организации дорожного движения на территории города Москвы в пределах МКАД.

При выполнении расчетов выбросов загрязняющих веществ в работе были приняты допущения:

- Основные показатели улично-дорожной сети не меняются в период 2024-2030 гг. (таблица 4.1);
- Средняя скорость транспортных потоков изменяется линейно на всех участках УДС (таблица 4.2);
- Состав транспортного потока по типу транспортных средств, по виду используемого топлива остается идентичным на всех участках УДС в базовый (2024 год) расчетный год, далее изменяется согласно сценариям (таблица 4.3); состав транспортного потока приведен согласно форме №1-БДД как для автомобильного парка Москвы;
- Интенсивность движения транспортных средств остается неизменной на всех участках улично-дорожной сети для всего расчетного периода (таблица 4.4);

Основные показатели улично-дорожной сети Москвы в пределах МКАД в 2024-2030 гг приведены в таблице 4.1.

Принято, что средняя скорость транспортных потоков изменяется линейно на всех участках улично-дорожной сети; принято, что в каждом расчетном году средняя скорость увеличивается на 2 км/ч относительно предыдущего на всех расчетных участках УДС.

По данным на 1 июня 2025 года среднегодовой пробег транспортных средств в городе Москве составляет 19100 километров⁸. Приведенное значение было разбито на три расчетные зоны в соотношении СК:ТТК:МКАД=0,11:0,24:0,65, отношения установлены экспертным путем. Показатели средней скорости и среднегодового пробега приведены в таблице 4.2.

⁸ «Автостат»: самый высокий среднегодовой пробег у авто в РФ на Северном Кавказе. URL: <https://auto.mail.ru/article/106549-nazvaniy-regiony-rf-s-samyim-vyisokim-srednegodovym-probegom-avto/> (дата обращения: 18.06.2025).

Таблица 4.1 – Основные показатели улично-дорожной сети Москвы в пределах МКАД в 2024-2030 г.г.

Основные показатели	2024	2028	2029	2030
	ВНУТРИ САДОВОГО КОЛЬЦА*			
Общая площадь территории, м ²	20188341,7	20188341,7	20188341,7	20188341,7
Периметр, м	16342,9	16342,9	16342,9	16342,9
Общая длина УДС, км	285	285	285	285
Общая удельная длина УДС, приведенная к одной полосе, км	504	504	504	504
Общая длина трамвайных путей, км	26,2	26,2	26,2	26,2
МЕЖДУ ТТК И САДОВЫМ КОЛЬЦОМ**				
Общая площадь территории, м ²	68396674,8	68396674,8	68396674,8	68396674,8
Периметр, м	58203,3	58203,3	58203,3	58203,3
Общая длина УДС, км	940	940	940	940
Общая удельная длина УДС, приведенная к одной полосе, км	1540	1540	1540	1540
Общая длина трамвайных путей, км	180,4	180,4	180,4	180,4
МЕЖДУ МКАД И ТТК***				
Общая площадь территории, м ²	811456145	811456145	811456145	811456145
Периметр, м	174050,6	174050,6	174050,6	174050,6
Общая длина УДС, км	6135	6135	6135	6135
Общая удельная длина УДС, приведенная к одной полосе, км	10836	10836	10836	10836
Общая длина трамвайных путей, км	213,4	213,4	213,4	213,4

*) – включая оба направления Садового кольца; **) – включая оба направления ТТК;

***) – включая оба направления МКАД

Состав транспортного потока по типу транспортных средств, по виду используемого топлива остается идентичным на всех участках УДС в базовом году (2024 год), однако в 2028-2030 расчетных годах изменяется согласно приведенным в таблице 4.3 сценариям.

Таблица 4.2 – Показатели средней скорости и среднегодового пробега

Основные параметры	2024	2028	2029	2030
	ВНУТРИ САДОВОГО КОЛЬЦА*			
Средняя скорость всех поездок, км/ч	15	17	19	21
Среднегодовой пробег транспортных средств, км	2101	2101	2101	2101
МЕЖДУ ТТК И САДОВЫМ КОЛЬЦОМ**				
Средняя скорость всех поездок, км/ч	22	24	26	28
Среднегодовой пробег транспортных средств, км	4584	4584	4584	4584
МЕЖДУ МКАД И ТТК***				
Средняя скорость всех поездок, км/ч	30	32	34	36
Среднегодовой пробег транспортных средств, км	12415	12415	12415	12415

Таблица 4.3 – Сценарии развития транспортной инфраструктуры [13]

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

Подробные таблицы состава транспортного потока по типу транспортных средств, по виду используемого топлива и интенсивности движения при использовании авторской структуры транспортного потока находятся в Приложении Б.

Сценарий «Электрификация автомобильного транспорта» составлен согласно материалам Программы развития транспортного комплекса Москвы до 2030 года.

Таким образом с помощью расчетов представляется возможным оценить эффективность развития транспортной инфраструктуры в городе Москве к 2030 году с применением таких мероприятий как развитие инфраструктуры электромобилей и развитие городского пассажирского транспорта в качестве альтернативы личному транспорту.

По данным Центра организации дорожного движения Правительства Москвы (ЦОДД) в 2024 году на улицы столицы в среднем выезжало 2,79 млн автомобилей в день⁹. В таблице 4.4 приведено общее количество автомобилей, ежедневно выезжающих на дороги города Москвы, их разбивка на классы и зоны для 2024 (базового) года.

Таблица 4.4 – Количество автотранспортных средств, ежедневно выезжающих на дороги города Москвы, их разбивка на классы и зоны для 2024 (базового) года

Показатель	Количество ТС, ед	Отношение, %
Общее количество	2790000	100
Из них:		
M1	2432043	87,17
M2	21204	0,76
M3	17577	0,63
N1	163215	5,85
N2	67518	2,42
N3	88443	3,17
Разбивка по зонам		
Внутри СК	307214	0,11
Внутри ТТК	670285	0,24
Внутри МКАД	1815355	0,65

⁹ К 2025 году число зарегистрированных авто в Москве и области вырастет до 8,9 млн | Metro Москва | Дзен. URL: https://dzen.ru/a/Zx-K_azAWFrqBXF5 (дата обращения: 15.03.2025).

Для принятых сценариев было принято допущение, что интенсивность транспортных потоков и разбивка по зонам остаются неизменными на всем рассматриваемом временном интервале.

Как было отмечено ранее, эталонные транспортные средства и их показатели расхода топлива (электроэнергии) оказывают серьезное влияние на величину энергопотребления и выбросов ПГ транспортным потоком. Эталонные ТС выбирались путем анализа базы данных Росстата (ГИБДД) и объема продаж в Московском регионе, модели эталонных транспортных средств и показатели расхода топлива (электроэнергии) в цикле WLTP (л/100км или кВт*ч/100км), рассчитанные по описанным в главе 2 методикам приведены в таблице 4.5.

Результаты расчетов энергопотребления и выбросов ПГ транспортными потоками в городе Москве по приведенным сценариям с использованием разработанной методики приведены в таблице 4.6. и на рисунках 4.1 и 4.2.

На рисунке 4.3 и 4.4 изображены картограммы города Москвы, отражающие выбросы парниковых газов ($\text{тСО}_2\text{-экв/год}$) для всех рассматриваемых сценариев.

Картограммы созданы с помощью ГИС; произведена цветовая дифференциация классификации, цвета кластеров и их значения отражены в таблице 4.7.

Таблица 4.5 – Эталонные ТС, показатели их расхода топлива (электроэнергии), используемые для расчета энергопотребления и выбросов ПГ транспортными потоками в городе Москве по рассматриваемым сценариям.

Категория ТС	Модель эталонного ТС	Расход топлива WLTP, (л/100км)	Расход электроэнергии WLTP, (кВт*ч/100км)
Mini (б)	Chevrolet Spark	6,8	
Mini (д)	SMART FORTWO	5,17	
Mini (г)	Daewoo Matiz	7,5	
Small (б)	Nissan Note	9,97	
Small (д)	Ford Fusion	7,61	
Small (г)	SEAT Ibiza	7,8	

Продолжение таблицы 4.5

Medium (б)	Hyundai Creta	11,75	
Medium (д)	Volkswagen Tiguan	10,6	
Medium (г)	Lada Vesta КПП	10,73	
Large (б)	KIA Sorento	17,81	
Large (д)	Volkswagen Toureg	14,64	
Large (г)	Toyota LC 200 КПП	26,26	
Легковые электромобили	Tesla Model S		20,5
N1 (б)	ГАЗель Next	24,86	
N1 (д)	ГАЗель Next	18,22	
N1 (г)	ГАЗель NEXT КПП	26	
N2 (б)	ГАЗ 3309	20,93	
N2 (д)	Man LE 8.180	20,8	
N2 (г)	ГАЗон Next КПП	21,76	
N3 (б)	GAZ 3307	25,74	
N3 (д)	КамАЗ 65117	32,89	
N3 (г)	КамАЗ 5490 НЕО КПП	39,71	
Грузовые электромобили	DAF LF Electric		95
M2 (б)	ГАЗель Next	24,86	
M2 (д)	Iveco Daily 50C15	15,21	
M2 (г)	ГАЗель NEXT	26	
M3 (б)	ПАЗ 3205	28,73	
M3 (д)	ЛиАЗ 5292.65	37,18	
M3 (г)	ЛиАЗ 5292.65 КПП	38,9	
Электробусы	КАМАЗ 6282		143,9
Троллейбусы	ЗиУ-9		180*
Трамваи	Витязь		160*

* - для Троллейбусов и Трамваев удельный расход электроэнергии указывается на километр пути (кВт*ч/км)

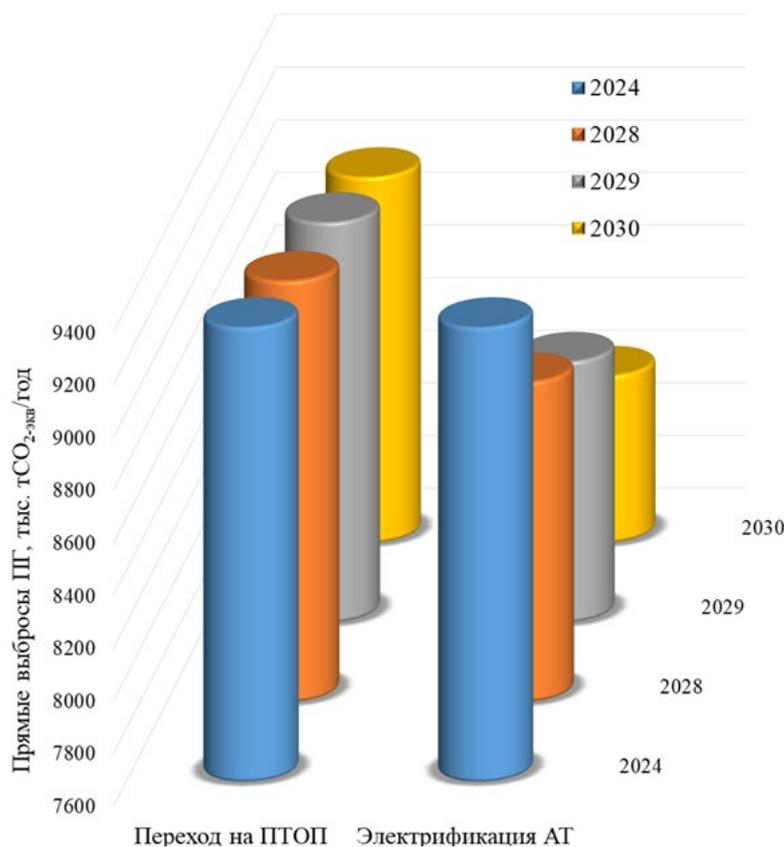


Рисунок 4.1 – Результаты расчетов прямых выбросов ПГ транспортными потоками по приведенным сценариям с использованием разработанной методики

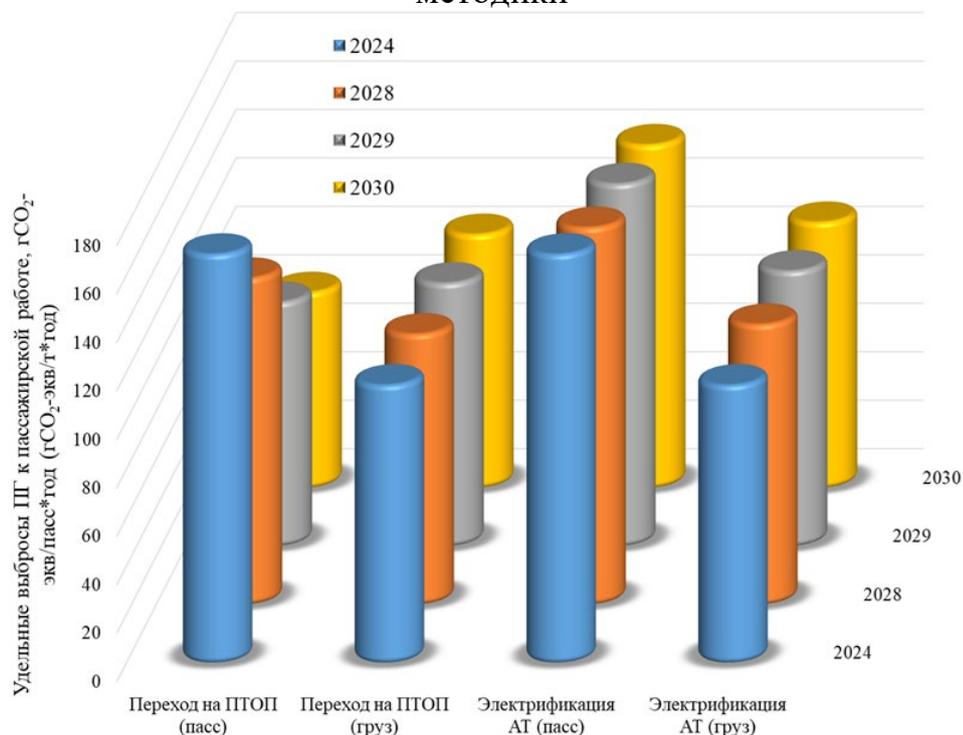


Рисунок 4.2 – Результаты расчетов удельных выбросов (на единицу транспортной работы) ПГ транспортными потоками по приведенным сценариям с использованием разработанной методики

Таблица 4.6 – Результаты расчетов энергопотребления и выбросов ПГ транспортными потоками по приведенным сценариям с использованием разработанной методики в городе Москве.

Участок	Энергопотребление транспортным потоком, МДж/год	Пассажирская работа, пасс*год	Транспортная работа, т*год	Прямые выбросы ПГ транспортным потоком, тСО ₂ -экв/год	Косвенные выбросы ПГ транспортным потоком, тСО ₂ -экв/год	Удельные выбросы ПГ к пассажирской работе, гСО ₂ -экв/пасс*год	Удельные выбросы ПГ к транспортной работе, гСО ₂ -экв/т*год
Базовый сценарий 2024 год							
СК	4030507699	1145359730	441830846	281442	731	191	143
ТТК	17482233464	5452120213	2103383298	1219133	3484	176	125
МКАД	116468993044	39992713253	15428291206	8108932	25550	162	106
Сумма	133951226508	45444833466	17531674504	9328065	29034	169*	115*
Электрификация автомобильного транспорта 2028 расчетный год							
СК	3802888467	1179508334	388885646	263453	3334	176	142
ТТК	16420794650	5614556545	1851281634	1134425	15870	161	125
МКАД	111386348274	41183507910	13579300426	7682613	116403	151	109
Сумма	127807142924	46798064455	15430582060	8817038	132273	156*	116*
Электрификация автомобильного транспорта 2029 расчетный год							
СК	3642699646	1190728724	388885646	252389	4160	167	137
ТТК	15947148637	5667969312	1851281634	1101439	19807	155	121
МКАД	108646085766	41575294273	13579300426	7490913	145268	145	107
Сумма	124593234403	47243263585	15430582060	8592352	165075	150*	114*
Электрификация автомобильного транспорта 2030 расчетный год							
СК	3499795971	1199752204	389314250	241237	5215	159	131
ТТК	15387643079	5711114608	1853371938	1059527	24827	148	116
МКАД	104449572709	41891709169	13594496386	7177347	182116	137	104
Сумма	119837215788	47602823777	15447868324	8236874	206943	142*	110*

Продолжение таблицы 4.6

Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) 2028 расчетный год							
СК	3981322379	1412716392	441830846	277563	1265	153	138
ТТК	17100514632	6724880419	2103383298	1190850	6033	140	120
МКАД	115236203214	49328355003	15428291206	8011400	44235	130	104
Сумма	132336717846	56053235422	17531674504	9202250	50268	135*	112*
Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) 2029 расчетный год							
СК	3912683166	1870349383	441830846	271853	1429	114	132
ТТК	16980503479	8903418854	2103383298	1178597	6803	105	116
МКАД	114594861112	65307960977	15428291206	7943502	49908	98	102
Сумма	131575364591	74211379831	17531674504	9122099	56711	101*	109*
Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) 2030 расчетный год							
СК	3870099096	2301281082	441830846	268800	1563	92	127
ТТК	16769488933	10954765272	2103383298	1163085	7449	85	111
МКАД	113017387814	80355228384	15428291206	7828539	54561	78	99
Сумма	129786876747	91309993656	17531674504	8991624	62010	81*	105*

* Удельные выбросы ПГ к транспортной и пассажирской работы просуммированы средневзвешенно. В качестве весов используется коэффициенты разбивки трафика по зонам из таблицы 4.4.

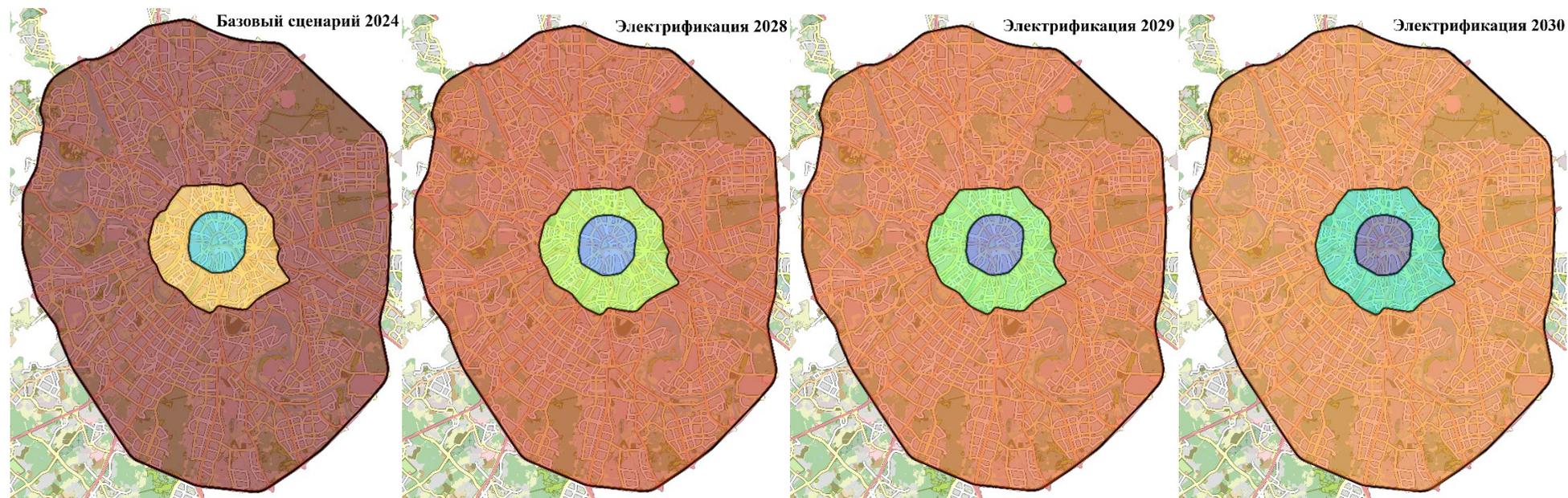


Рисунок 4.3 – Картограммы города Москвы, отражающие выбросы парниковых газов (тCO₂-экв/год), для базового года и сценария электрификации транспорта.

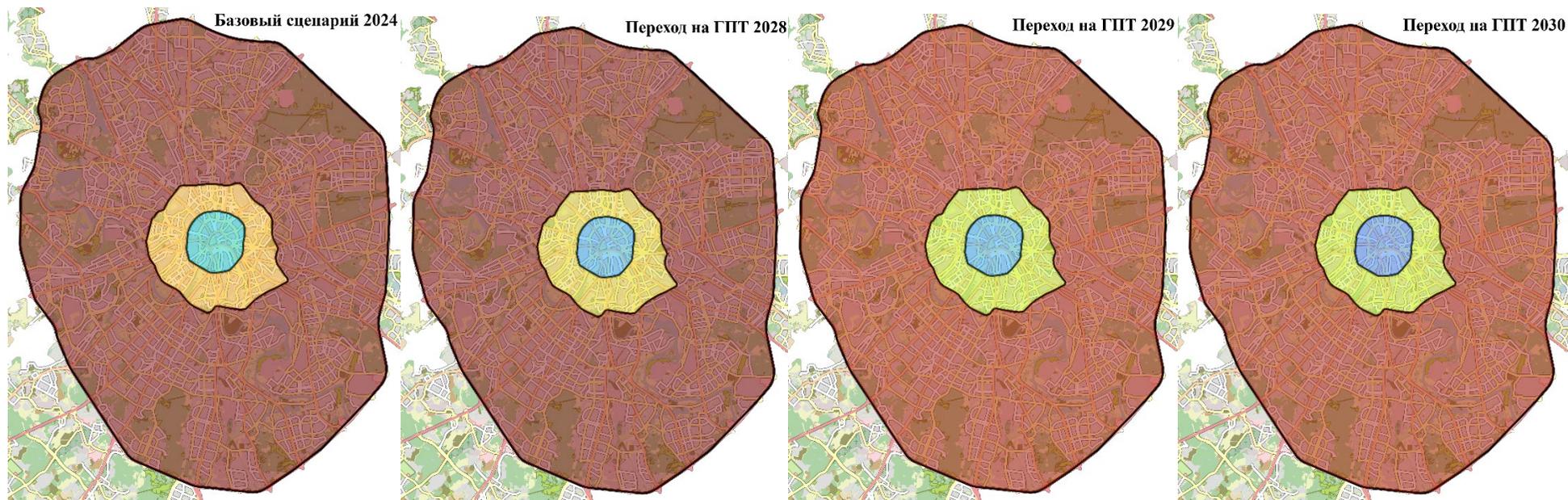


Рисунок 4.4 – Картограммы города Москвы, отражающие выбросы парниковых газов ($tCO_2\text{-экв/год}$), для базового года и сценария перехода на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)

Таблица 4.7 – Кластеризация выбросов парниковых газов ($tCO_2\text{-экв/год}$).

№ кластера	Значение выбросов ПГ, $tCO_2\text{-экв/год}$	Цвет	№ кластера	Значение выбросов ПГ, $tCO_2\text{-экв/год}$	Цвет
1	0 – 200 000		11	1 150 000 – 1 118 000	
2	240 000 – 250 000		12	1 118 000 – 1 121 000	
3	250 000 – 260 000		13	1 121 000 – 1 124 000	
4	260 000 – 270 000		14	1 124 000 – 1 127 000	
5	270 000 – 280 000		15	1 127 000 – 7 250 000	
6	280 000 – 290 000		16	7 250 000 – 7 500 000	
7	1 030 000 – 1 060 000		17	7 500 000 – 7 750 000	
8	1 060 000 – 1 090 000		18	7 750 000 – 8 000 000	
9	1 090 000 – 1 120 000		19	8 000 000 – 8 250 000	
10	1 120 000 – 1 150 000				

Как видно из таблицы 4.6 и рисунков 4.1 – 4.4 в случае развития транспортной инфраструктуры по сценарию электрификации автомобильного транспорта прямые выбросы ПГ транспортными потоками в городе Москве могут снизиться на 12% (с 9328065 тСО_{2-ЭКВ}/год в 2024 базовом году до 8236874 тСО_{2-ЭКВ}/год в 2030 году). Однако, косвенные выбросы ПГ транспортными потоками при этом могут увеличиться на 613 % (с 29034 тСО_{2-ЭКВ}/год в 2024 базовом году до 206943 тСО_{2-ЭКВ}/год в 2030 году). Это обусловлено значительным увеличением доли электрических транспортных средств в транспорте потоке.

Вместе с тем, удельные выбросы ПГ на единицу транспортной работы имеют тренд линейного снижения с 169 гСО_{2-ЭКВ}/пасс*год и 115 гСО_{2-ЭКВ}/т*год в базовом 2024 году до 142 гСО_{2-ЭКВ}/пасс*год (16 %) и 110 гСО_{2-ЭКВ}/т*год (23 %) в 2030 году соответственно.

В случае, если транспортная инфраструктура будет развиваться по сценарию перехода на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) ситуация с выбросами ПГ изменится. Прямые выбросы ПГ транспортными потоками в городе Москве снизятся в 2030 году на 4 % (с 9328065 тСО_{2-ЭКВ}/год в 2024 базовом году до 8991624 тСО_{2-ЭКВ}/год в 2030 году). При этом косвенные выбросы ПГ транспортными потоками увеличиваются на 114 % (с 29034 тСО_{2-ЭКВ}/год в 2024 базовом году до 62010 тСО_{2-ЭКВ}/год в 2030 году). Удельные выбросы ПГ на единицу транспортной работы имеют тренд линейного снижения - с 169 гСО_{2-ЭКВ}/пасс*год и 142 гСО_{2-ЭКВ}/т*год в базовом 2024 году до 81 гСО_{2-ЭКВ}/пасс*год (52 %) и 105 гСО_{2-ЭКВ}/т*год (26 %) в 2030 году соответственно.

Таким образом, при реализации принятых сценариев развития наземного городского транспорта ожидается значительное снижение удельных выбросов ПГ на пассажирскую работу (гСО_{2-ЭКВ}/пасс*год) в случае развития наземной транспортной инфраструктуры как по сценарию переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) (52 %), так и по сценарию перехода на наземного транспорта на электротягу (16%) по сравнению с 2024 годом. Такая

разница обусловлена повышением доли маршрутных транспортных средств общего пользования, перевозящих большое количество пассажиров на единицу подвижного состава.

Как показали результаты выполненных расчетов, прямые выбросы ПГ транспортными потоками на УДС будут снижаться интенсивнее в случае развития транспортной инфраструктуры по сценарию электрификации (12 %), в сравнении со сценарием «Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)» (4 %).

В итоге можно заключить, что сценарий электрификации автомобильного транспорта является более приоритетным, чем развитие пассажирского транспорта общего пользования (ПТОП), по причине значительного снижения прямых выбросов ПГ на транспортной сети города Москвы. Рост косвенных выбросов можно контролировать путем установки более совершенного оборудования по снижению выбросов парниковых газов на стационарных источниках производства электроэнергии, переходом на зеленую энергетику и другими способами, что гораздо эффективнее, чем контролировать выбросы мобильных источников, в данном случае транспортных средств в составе транспортных потоков на улично-дорожной сети города.

Вместе с тем, при условии развития транспортной инфраструктуры при реализации двух приведенных сценариев одновременно, можно ожидать как значительное снижение прямых валовых выбросов ПГ наземным транспортом, так и удельных выбросов ПГ наземным транспортом на единицу пассажирской транспортной работы.

4.2 Верификация и валидация методики расчетной оценки выбросов ПГ транспортными потоками на сети

Верификация исходных данных методики проводилась в несколько этапов. На этапе определения значений расхода топлива (электроэнергии)

единичными колесными транспортными средствами в цикле WLTP (за исключением трамваев и троллейбусов) с помощью разработанных методик, проводилось сравнение полученных результатов с данными заводоизготовителей, полученных при помощи тестирования автомобилей в реальной среде или на динамическом стенде. Подробная информация об этом содержится в главе 2 настоящего исследования.

Значения численности перевезенных пассажиров и массы перевезенных грузов были установлены экспериментальным путем на примере Кутузовского проспекта – крупнейшей вылетной автомагистрали города Москвы. Подробные сведения о проведенном эксперименте размещены в главе 3 настоящего исследования.

Исходные данные с количеством транспортных средств и распределение их по типам принято согласно формы № 1-БДД.

Вспомогательные данные были получены из общедоступных источников, научных публикаций и результатов сторонних исследований. Следует отметить, что их надежность ограничена, а верификация потребовала бы проведения дополнительных изысканий, не входящих в цели настоящего исследования.

В то же время, основные исходные параметры, критически влияющие на результат разработанной методики расчета, характеризуются высокой достоверностью. Реализация методики в виде программы Microsoft Excel предусматривает встроенную процедуру контроля вводимой информации, что минимизирует вероятность ошибок оператора.

Таким образом, несмотря на отмеченные ограничения, можно констатировать, что общая достоверность результатов оценки выбросов парниковых газов транспортными потоками в представленной модели является удовлетворительной. В мировой практике валидацию модели или методики принято проводить путем сравнения выходных характеристик реальной системы и результатов расчетов, полученных при помощи модели или методики. В данном случае, получить реальные данные выбросов

парниковых газов транспортными потоками на УДС города Москвы не представляется возможным. Поэтому принято решение провести сравнение результатов расчетов по разработанной методике с наиболее полной и достоверной методикой COPERT 5, описание которой приведено в главе 1 настоящего исследования [77].

Исходные данные, необходимые для расчетов по методике COPERT 5 идентичны, разбивка по экологическим классам, необходимая для нормальной работы методики, проведена согласно форме №1-БДД. Результаты сравнения значений выбросов ПГ транспортными потоком при использовании авторской методики и методики COPERT 5 приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты сравнения значений выбросов ПГ транспортными потоком при использовании авторской методики и методики COPERT 5

Сценарий	Авторская методика	Методика COPERT 5	Средняя абсолютная ошибка, тСО _{2-экв} /Год	Относительная ошибка, %
	Выбросы ПГ транспортным потоком, тСО _{2-экв} /Год	Выбросы ПГ транспортным потоком, тСО _{2-экв} /Год		
Базовый сценарий 2024 год	9 328 065	10 020 382	692 317	6,91
Электрификация автомобильного транспорта 2028 год	8 817 038	9 393 021	575 983	6,13
Электрификация автомобильного транспорта 2029 год	8 592 352	9 106 569	514 217	5,65
Электрификация автомобильного транспорта 2030 год	8 236 874	8 677 230	440 446	5,07
Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) 2028 год	9 202 250	9 853 658	651 408	6,61
Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) 2029 год	9 122 099	9 756 325	634 226	6,47
Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) 2030 год	8 991 624	9 608 745	617 121	6,42

Сравнение показателей работы методик следует выполнять с помощью общепринятых статистических критериев.

Средняя абсолютная ошибка: среднее отклонение абсолютных значений, рассчитывается по формуле:

$$\delta_{\alpha} = \frac{1}{N} \times \sum (Z_i - U_i) = 589388,3 \quad (4.1)$$

Средняя относительная ошибка: среднее отклонение абсолютных значений в % рассчитывается по формуле:

$$\delta_{\rho} = \frac{\sum (Z_i - U_i)}{\sum Z_i} \times 100\% = 6,21\% \quad (4.2)$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

$$r = \frac{\sum (Z_i - \bar{Z}) \times (U_i - \bar{U})}{\sqrt{\sum (Z_i - \bar{Z})^2 \times \sum (U_i - \bar{U})^2}} = 0,99992 \quad (4.3)$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \times \sum Z_i; \bar{U} = \frac{1}{N} \times \sum U_i$$

где Z – значение, полученное при использовании методики COPERT 5, U – значение, полученное при использовании авторской методики, N – количество расчетов, в данном случае равняется 7, \bar{Z} – среднее значение выборки Z , \bar{U} – среднее значение выборки U .

Рекомендуемые значения могут иметь только относительные показатели и коэффициент корреляции. В отечественной практике еще не выработаны нормативные значения данных критериев, при которых модель считается достоверной. В качестве ориентировочных значений можно принять следующие: относительные показатели не более 10%, коэффициент корреляции не менее 0,9. Таким образом, полученные значения с использованием формул 4.1-4.3 соответствуют минимальным значениям и методику можно считать достоверной.

Выводы по главе 4

С использованием разработанной методики расчетной оценки выбросов ПГ транспортными потоками на УДС осуществлена оценка эффективности мероприятий по организации дорожного движения на УДС крупного города (Москва). Использование геоинформационных систем и теории графов позволило не только получить количественные оценки, но и визуализировать

пространственное распределение выбросов парниковых газов (ПГ) транспортными потоками по территории города.

Выполнен сценарный прогноз выбросов прямых и косвенных валовых и удельных выбросов ПГ транспортными потоками на УДС по двум альтернативным сценариям развития транспортной системы до 2030 года:

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

При реализации сценария «Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)» предположительно обеспечит более скромное снижение прямых валовых выбросов ПГ транспортными потоками (на 4%), но демонстрирует максимальную эффективность в снижении удельных выбросов ПГ транспортными потоками на УДС на единицу пассажирской транспортной работы (на 52%). Это обусловлено резким увеличением пассажиропотока, обслуживаемого общественным транспортом.

Определен приоритет между сценариями: с точки зрения минимизации абсолютного воздействия наземного транспорта на климат в пределах территории МКАД (прямые валовые выбросы ПГ транспортными потоками) более эффективен сценарий «Электрификация автомобильного транспорта». С точки зрения энерго-экологической эффективности наземного транспорта (удельные выбросы ПГ транспортными потоками на единицу пассажирской транспортной работы) и повышения мобильности населения более предпочтителен сценарий «Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)».

Проведена успешная валидация результатов расчетной оценки выбросов ПГ транспортным потоком с использованием разработанной методики. Сравнение результатов расчетов с расчетными данными, полученными при использовании международно-признанной методики COPERT 5, показало высокую степень соответствия.

Сделан важный практический вывод: Рост косвенных валовых выбросов ПГ наземными транспортными средствами при их электрификации можно остановить и снизить за счет декарбонизации процессов получения электроэнергии (переход на возобновляемые источники энергии, модернизация ТЭЦ). В то же время, контроль прямых валовых выбросов ПГ от миллионов одиночных автомобилей в транспортных потоках представляет собой гораздо более сложную задачу. Это говорит о целесообразности перехода наземного транспорта на электротягу. Вместе с тем, необходимо отметить, что одновременная реализация обоих сценариев даст максимальный энерго-экологический эффект.

Таким образом, разработанная методика может стать хорошим методическим инструментом для обоснования, планирования и прогнозирования энерго-экологической эффективности мероприятий транспортной политики, позволяя количественно оценивать компромиссы между различными стратегиями развития транспортного комплекса мегаполиса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Путем системного анализа и обобщения отечественного и зарубежного опыта проведен критический обзор существующих методов оценки энерго-экологической эффективности единичных колесных транспортных средств и транспортных потоков на улично-дорожной сети крупных городов и мегаполисов.

Проведенный анализ выявил системные пробелы в отечественных методиках оценки выбросов загрязняющих веществ и расходов топлива одиночными ТС. Основная методика Минтранса (№ АМ-23-Р) непрозрачна и не обеспечивает достоверной оценки парниковых газов, а методические подходы для транспортных потоков, сформулированные несколько десятилетий назад, морально устарели и требуют совершенствования.

Анализ показал, что для оценки и минимизации выбросов загрязняющих веществ, парниковых газов, потребления топлива транспортными потоками на УДС целесообразно использовать современные инструменты математического и имитационного моделирования, позволяющие рассматривать и прогнозировать процессы в реальном времени процессы, происходящие на отдельных участках УДС крупного города. Но для эффективного решения рассматриваемых проблем на сетевом уровне требуется кроме них использовать и другие инструменты научных исследований.

Представляется, что совмещение ГИС-технологий и теории графов позволяет сформировать комплексную модель для выявления и детализации во времени и пространстве передвижных источников выбросов парниковых газов, других загрязняющих веществ, топливопотребления на всей УДС, а также визуализации зон загрязнения, что значительно повышает наглядность полученных результатов. При этом по мнению автора, в комплексной модели оценки энерго-экологической эффективности единичных колесных транспортных средств и транспортных потоков на УДС в целом должны учитываться выбросы, безопасность, транспортная доступность и социально-экономические показатели.

2. Проведен анализ значений удельной энергоэффективности транспортных потоков на УДС крупного города пяти основных вариантов структур по типу АТС и виду используемого топлива (энергии). Установлено, что при увеличении детализации структуры одного и того же транспортного потока, состоящего из одних и тех же моделей (марок) транспортных средств, увеличивается значение его энергопотребления. При этом значение удельного расхода топлива транспортным потоком на УДС, разбитым на 18 групп АТС (согласно классификации COPERT 5) на 5,6% отличается от значения удельного расхода топлива транспортным потоком, состоящим из 3-х групп АТС по типу (легковой, грузовой, автобус).

Разработана авторская структура транспортного потока на УДС крупного города по типу АТС и виду используемого топлива (энергии), адаптированная под использование общедоступных государственных данных. Проведенный анализ существующих структур показал, что ключевое влияние на удельный расход топлива оказывают легковые автомобили в силу их преобладания в транспортном потоке. Для категории М1 (легковые автомобили) была заимствована классификация из программного комплекса COPERT (mini, small, medium, large). Кроме того, ввиду прогнозируемого роста доли электромобилей в транспортных потоках на УДС крупных городов, было принято решение выделить в отдельные группы легковые, грузовые электромобили и электробусы.

3. Разработана комплексная методика оценки энергопотребления и выбросов парниковых газов транспортными потоками, находящимися на УДС крупного города, которая позволяет рассчитывать удельные (на единицу транспортной работы) и валовые (прямые и косвенные) значения топливопотребления и выбросов парниковых газов транспортными потоками, а также переход к реальным условиям эксплуатации через систему поправочных коэффициентов.

Особенность методики состоит в том, в ней рассматривается авторская структура транспортного потока на УДС крупного города по типу АТС и виду используемого топлива (энергии) (разбиение по категориям), в каждой из которых рассматриваются не сотни и тысячи марок, моделей ТС, а только наиболее типичные (максимально присутствующие в городских транспортных потоках), т.н.

«эталонные» ТС, выбранные для каждой категории на основе государственной статистики или открытых баз данных. Более полный и достоверный учет эксплуатационных условий влияния на величину топливопотребления и выбросов ПГ транспортным потоком на УДС в методике достигается использованием коэффициентов k_1 - k_3 , полученных путем разложения цикла WLTP на фазы, позволяющим пересчитать удельный расход топлива (и соответственно выбросы ПГ) при движении транспортного потока разной интенсивности, состава по типу АТС и виду используемого топлива в диапазоне средних скоростей движения от 10 до 100 км/ч. В состав комплексной методики входят модули расчета расхода топлива одиночными транспортными средствами, составляющими транспортный поток. Для ТС полной массой до 3,5 т введен комплексный показатель (К), позволяющий с высокой достоверностью (коэффициент детерминации 0.81–0.97) оценивать расход топлива (энергии) в зависимости от снаряженной массы ТС, рабочего объема двигателя, фактора обтекаемости. Установлены достоверные регрессионные зависимости комплексного показателя от расхода топлива (энергии) для автомобилей с ДВС и электромобилей. Для тяжелых ТС применяются данные международной базы MARLIS (HBEFA) с последующим расчетом расхода топлива по методу углеродного баланса.

Методика позволяет количественно оценить как удельные (на километр пробега), так и валовые показатели энергопотребления (в МДж), расхода топлива (в литрах), потребления электроэнергии на тягу (в кВт*ч) и выбросов парниковых газов (прямых и косвенных, в тоннах CO_2 -экв.).

4. Для формирования блока исходных данных и подтверждения достоверности разработанной комплексной методики было проведено натурное обследование транспортных потоков на одной из основных вылетных автомагистралей г. Москвы - Кутузовском проспекте в период с 13 по 15 мая 2022 года с использованием видеокамер, размещенных одновременно на обеих сторонах автомагистрали на разных его участках, для охвата транспортного потока, движущегося в обоих направлениях. Общий объем видеoinформации с результатами обследования трафика составил более 210 ГБ.

Натурное обследование производилось в утренний и вечерний часы пик буднего дня, в ночное время, и в утренний и вечерние часы пик выходного дня.

Установлены значения показателей, которые необходимы для использования в разработанной методике, в том числе коэффициенты загрузки транспортных средств разных типов. Выяснилось, что в единице легкового транспорта в среднем за поездку находится 1,45 пассажира, в автомобилях-такси, в среднем, перевозится примерно 2,3 пассажира. Среднее количество пассажиров, перевозимое микроавтобусами массой до 3,5 т, составляет 4,0 пассажира. Установлено, что заполняемость автобусов, находившихся в составе транспортного потока, составляет 20 пассажиров для автобусов полной массой до 12 т и 50 пассажиров для автобусов массой свыше 12 т.

5. Выполнен сценарный прогноз выбросов прямых и косвенных валовых и удельных выбросов ПГ транспортными потоками на УДС по двум альтернативным сценариям развития транспортной системы до 2030 года: электрификация автомобильного транспорта (доля автомобилей с тяговым электродвигателем возрастает до 7 % к 2030 году в сравнении с 0,67% в базовом 2024 году) и развитие пассажирского транспорта общего назначения (доля ПТОП возрастает до 5 % к 2030 году в сравнении с 1,1 % в базовом 2024 году).

По результатам расчетов установлено, что в случае развития транспортной инфраструктуры по сценарию электрификации автомобильного транспорта прямые выбросы ПГ транспортными потоками на УДС г. Москвы могут снизиться к 2030 году по сравнению с 2024 годом на 12% и составить 8,24 млн. т CO₂-экв/год. Удельные выбросы ПГ на единицу пассажирской транспортной работы в данный период времени могут снизиться на 16% (с 169 гCO₂-экв/пасс*год до 142 гCO₂-экв/пасс*год и единицу грузовой транспортной работы на 23% (со 115 гCO₂-экв/т*год до 110 гCO₂-экв/т*год).

В случае, если транспортная инфраструктура будет развиваться по сценарию перехода на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП), прямые выбросы ПГ транспортными потоками в городе Москве снизятся в 2030 году на 4 % (до 8,99 млн. тCO₂-экв/год). Удельные выбросы ПГ на единицу пассажирской

транспортной работы при этом снизятся на 52% (с 169 гСО₂-экв/пасс*год до 81 гСО₂-экв/пасс*год и грузовой транспортной работы – на 26 % (с 142 гСО₂-экв/т*год до 105 гСО₂-экв/т*год).

В ходе диссертационного исследования была проведена верификация исходных данных и валидация результатов расчетов по разработанной методике. Высокая достоверность входных данных обеспечивается получением их из надежных источников (данные заводов-изготовителей, государственная статистика). В условиях невозможности измерения реальных выбросов ПГ транспортными потоками была проведена валидация путем сравнения результатов расчетов с использованием авторской методики с результатами, полученными по общепризнанной методике COPERT 5. Сравнение проводилось по семи вариантам расчета по обеим методикам с использованием идентичных исходных данных. Получена высокая степень согласованности.

6. Методика адаптирована для решения прикладных задач, в том числе для подтверждения соответствия проектов критериям «зеленого финансирования». Предусмотрен переход от валовых выбросов к удельному показателю на единицу транспортной работы (пассажиры-километр или тонно-километр).

Для практического применения на уровне УДС разработан инженерный вариант методики, которая включает матрицы со значениями удельного расхода топлива для укрупненного состава транспортного потока по типам (легковые, легкие коммерческие автомобили, грузовики и автобусы) для интенсивности движения от 200 до 2200 автомобилей/час на полосу и средней скорости потока от 10 до 100 км/ч.

С использованием разработанной методики произведен расчет значений расхода электроэнергии на тягу (базового и эксплуатационного) 46 электромобилей различных марок и моделей, которые включены в актуальную редакцию методики № АМ-23-Р от 30.09.2021 года.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ПГ – парниковые газы;

ТС – транспортное средство;

Б – бензин;

ДТ – дизельное топливо;

КПГ (CNG) – компримированный природный газ;

КТС – колесное транспортное средство;

СПГ – сжиженный природный газ;

УДС – улично-дорожная сеть;

ЕРА (FTP-75) – Environmental Protection Agency (Federal Test Procedure 75) – измерительный ездовой цикл Европейского агентства по охране окружающей среды;

NEDC – New European Driving Cycle – измерительный ездовой цикл;

WLTC (WLTP) – Всемирные согласованные процедуры испытаний легких транспортных средств Глобальных технических правил № 15 ЕЭК ООН (ГТП 15)

ГБО – Газобаллонное оборудование;

Гибридное топливо (Flexible Fuel Vehicles (FFV)) – автотранспортные средства, работающие как на бензине, так и на его смеси с этанолом;

ГИС – геоинформационная система;

ПТОП – пассажирский транспорт общего пользования

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автомобильные дороги: безопасность, экологические проблемы, экономика [Текст] : Российско-германский опыт / Под ред. В.Н. Луканина и К.-Х.Ленца. - М. : Логос, 2002. - 607 с. - 2000 экз. - ISBN 5-94010-190-9
2. Ахмадуллин, И. М. Анализ способов контроля расхода топлива посредством систем спутникового мониторинга / И. М. Ахмадуллин, И. Д. Гафуров, Р. Р. Валиуллин // Совершенствование конструкции, эксплуатации и технического сервиса автотракторной и сельскохозяйственной техники : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 120-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки БАССР, профессора Александра Петровича Ланге, Уфа, 24–25 ноября 2016 года. – Уфа: Башкирский государственный аграрный университет, 2016. – С. 44-51. – EDN YGCSJNB.
3. Вершинин, О. С. Система измерения расхода топлива на транспортных средствах в условиях эксплуатации и ее аппаратурная реализация: специальность 05.11.13 "Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вершинин Олег Станиславович. – Казань, 2009. – 16 с. – EDN NLAJUL.
4. Вохмин, Д. М. Основы мониторинга углеродного следа транспортных потоков крупных городов / Д. М. Вохмин, Е. С. Козин // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2024. – № 6. – С. 11-17. – DOI 10.36535/0236-1914-2024-06-2. – EDN DRCFKY.
5. Галиев, И. Р. Актуальность использования электромобилей в Барнауле / И. Р. Галиев, А. А. Грибанов // Вестник науки. – 2024. – Т. 3, № 11(80). – С. 1338-1341. – EDN LOKURC.
6. ГОСТ Р 41.101–99. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, оборудованных двигателем внутреннего сгорания, в отношении измерения объема выбросов диоксида углерода и расхода топлива, а также транспортных средств категории M₁ и N₁,

оборудованных электроприводом, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2001. 206 с.

7. ГОСТ Р 56162-2019. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу. Метод расчета количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу потоками автотранспортных средств на автомобильных дорогах разной категории. – Москва: Стандартиформ, 2019. 12 с.

8. Григорьев, М. В. Исследование и разработка устройства измерения расхода топлива для бензиновых ДВС / М. В. Григорьев, В. А. Зенченко, Н. С. Шуваева // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2021. – № 4(67). – С. 3-9. – EDN SMTVMX.

9. Гусаков, С. В. Сравнение испытательных ездовых циклов при оценке эксплуатационного расхода топлива двигателями легковых автомобилей / С. В. Гусаков, П. П. Ощепков // Журнал автомобильных инженеров. – 2016. – № 1(96). – С. 42-47. – EDN WHTTТТ.

10. Деянов, Д.А. 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. – EDN GBHHYE.

11. Деянов, Д.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. – EDN EQSGDY.

12. Дрючин, Д. А. Методология организации функционирования системы городского пассажирского наземного транспорта на основе согласования взаимодействия подсистем : специальность 2.9.5 "Эксплуатация автомобильного транспорта" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Дрючин Дмитрий Алексеевич. – Оренбург, 2024. – 400 с.

13. Ефимов, И. Н. Моделирование транспортных потоков с помощью сетевых задач / И. Н. Ефимов, А. В. Деревнин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2011. – № 3(51). – С. 142-145. – EDN OFZUIR.

14. Илюшин, Р. В. Исследование и разработка технологии восстановления экологического класса легковых автомобилей с карбюраторным двигателем : специальность 05.02.13 "Машины, агрегаты и процессы (по отраслям)" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Илюшин Роман Вадимович. – Москва, 2010. – 153 с. – EDN QEUNXN.

15. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль. Теория эксплуатационных свойств. – М.: Машиностроение, - 1989. – 237 с.

16. Ложкин, В. Н. Применении геоинформационных систем для экологического контроля городского транспорта / В. Н. Ложкин, О. В. Ложкина, А. Ю. Пенченков // Научно-аналитический журнал "Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России". – 2016. – № 4. – С. 42-51. – EDN XSFCTH.

17. Ложкина, О. В. Количественная оценка выбросов поллютантов и парниковых газов автотранспортом по европейской методологии COPERT, адаптированной к условиям Санкт-Петербурга / О. В. Ложкина, В. Н. Ложкин // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2013. – № 4(28). – С. 19-26. – EDN RUPMUZ.

18. Луканин В.Н., Буслаев А.П., Яшина М.В. Автотранспортные потоки и окружающая среда-2: Учебное пособие для вузов/Под ред. В.Н.Луканина. – М.: ИНФРА-М, 2001. – 646 с.

19. Максимова О.В., Лытов В.М., Гинзбург В.А. Сравнительный анализ методик расчета углеродного следа автотранспорта в России // Контроль качества продукции. 2020. № 7. С. 44-48.

20. Маняшин, С.А. Методика определения и использования типичных ездовых циклов автомобиля / А.В. Маняшин, С.А. Маняшин // Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – 2011. – № 3. – С. 25-29.

21. Методика определения массы выбросов загрязняющих веществ автотранспортными средствами в атмосферный воздух. М.: НИИАТ, 1993.

22. Методика определения расхода топлива автомобиля с использованием данных диагностического протокола OBD II / Ю. И. Молев, П. С. Мошков, Д. А. Соколов [и др.] // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8-1. – С. 74-78. – EDN UGZHFL.

23. Методика проведения инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для автотранспортных предприятий (расчетным методом) — Редакция от 28.10.1998 — Контур.Норматив [Электронный ресурс] // Информационный вебсайт. – Электрон. текст. и граф. дан. – URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=98195> (дата обращения: 11.11.2024)

24. Методы расчета углеродного следа объектов дорожностроительного комплекса / Н. И. Шестаков, Д. К. Таргонский, Н. С. Аргат, Б. А. Моргоев // Экология урбанизированных территорий. – 2024. – № 1. – С. 76-81. – DOI 10.24412/1816-1863-2024-1-76-81. – EDN АНННMG.

25. Московкин, В. В. Нормирование расхода топлива на примере автопоезда SCANIA R480LA4X2HLA / В. В. Московкин, М. Н. Гуров, А. С. Шкель // Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике : сборник научных трудов международной научно-технической конференции, Москва, 04–06 апреля 2016 года / Московский технологический университет, Физико-технологический институт. Том Выпуск 2 (XXII). – Москва: Московский технологический университет (МИРЭА), 2016. – С. 260-264. – EDN UUVLZZ.

26. Научно-практический комментарий к Федеральному закону от 29 декабря 2017 г. № 443-ФЗ "Об организации дорожного движения в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" : практическое пособие / Тюменский институт повышения квалификации сотрудников МВД России. – Тюмень : Тюменский институт

повышения квалификации сотрудников Министерства внутренних дел Российской Федерации, 2020. – 110 с. – ISBN 978-5-93160-296-7. – EDN QQKRMZ.

27. Несколько способов контроля расхода топлива на предприятии: плюсы и минусы. – URL: <https://www.fmeter.ru/infocenter/helpful/20200729-fuel-consumption-control-methods/> (Дата обращения: 01.10.2022)

28. Новиков, А.Н. Управление качеством окружающей среды региона при воздействии автотранспорта (на примере Орловской области) [Текст] / А.Н. Новиков, О.А. Иващук // Проблемы эксплуатации и обслуживания транспортно-технологических машин: доклады международной научно-технической конференции. - 2006. - С. 146-148.

29. Об утверждении Порядка организации работ по оценке выбросов от отдельных видов передвижных источников от 01 ноября 2013 – URL: <https://docs.cntd.ru/document/499073959> (дата обращения: 22.09.2023).

30. ОДМ 218.4.033-2017. Отраслевой дорожный методический документ. Методические рекомендации по созданию системы опытно-экспериментальных полигонов на действующей сети автомобильных дорог федерального значения для внедрения новых технологий и материалов в дорожном хозяйстве в различных природно-климатических зонах Российской Федерации — Информавтодор [Электронный ресурс] // Информационный вебсайт. – Электрон. текст. и граф. дан. – URL: <https://rosavtodor.gov.ru/storage/app/media/uploaded-files/236odm-2184033-2017.pdf> (дата обращения: 11.07.2024)

31. Оценка выбросов парниковых газов автотранспортом АК "АЛРОСА" / И. В. Зырянов, Н. Е. Кулинич, Ф. Ю. Иванов, В. А. Кожин // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 1(119). – С. 9-13. – EDN VLMLYF.

32. Патент № 2199091 С2 Российская Федерация, МПК G01F 9/00, G07C 5/10. способ учета расхода топлива двигателем внутреннего сгорания транспортного средства : № 2000130485/28 : заявл. 06.12.2000 : опубл. 20.02.2003 / А. А. Охотин, В. П. Гриневич ; заявитель Государственное унитарное предприятие Всероссийский научно-исследовательский институт тепловозов и путевых машин. – EDN ХСВОЗА.

33. Петров В.Ю., Якимов М.Р. Транспортные модели городов – Современное состояние и инновации транспортного комплекса: материалы междунар. науч. техн. конф. г.Пермь 17-18 апр. 2008, в 2 т,Т.II – с.234 – 246.

34. Петрушов, В. А. Разработка метода оценки влияния аэродинамических качеств, и сопротивлений качению автомобиля на топливную экономичность / В. А. Петрушов, Д. И. Хохлов // Труды НАМИ. – 2014. – № 258. – С. 5-38. – EDN ТЕКQРZ.

35. Потапченко, Т. Д. Верификация значений валовых выбросов парниковых газов автомобильным транспортом с помощью методов интеллектуального анализа данных / Т. Д. Потапченко, Ю. В. Трофименко // Информационные технологии и инновации на транспорте : Материалы 5-ой Международной научно-практической конференции, Орёл, 22–23 мая 2019 года / Под общей редакцией А.Н. Новикова. – Орёл: Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева, 2020. – С. 276-283. – EDN COMDАН.

36. Потапченко, Т. Д. Методика определения выбросов парниковых газов транспортной системы региона и оценки эффективности мероприятий по их сокращению : специальность 05.22.01 "Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Потапченко Тимур Дмитриевич, 2021. – 145 с. – EDN JALQСР.

37. Приказ Минприроды России от 27 ноября 2019 года N 804 «Об утверждении методики определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от передвижных источников для проведения сводных расчетов загрязнения атмосферного воздуха» – URL: <https://docs.cntd.ru/document/564062468> (дата обращения: 22.09.2023).

38. Расчет выбросов парниковых газов при эксплуатации автотранспорта на территории крупных городов Республики Татарстан / А. Р. Шагидуллин, А. Р. Магдеева, А. Ф. Гилязова [и др.] // Российский журнал прикладной экологии. – 2016. – № 2(6). – С. 22-25. – EDN WYКВАН.

39. Расчетная инструкция (методика) по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ от автотранспортных средств на территории крупнейших городов (на примере г. Москвы) – ОАО «НИИАТ» – М., 2012.

40. Реализация транспортной модели для оценки выбросов парниковых газов от автомобильного и внедорожного транспорта на Национальном уровне / В. М. Лытов, Ю. В. Трофименко, В. А. Гинзбург [и др.] // Системы контроля окружающей среды - 2024 : Тезисы докладов Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию Российской академии наук в рамках научно-технического сотрудничества Россия-АСЕАН-БРИКС, Севастополь, 05–08 ноября 2024 года. – Севастополь: ИП Куликов А.С., 2024. – С. 86. – EDN LFYYUO.

41. Рекомендации по учету требований по охране окружающей среды при проектировании автомобильных дорог и мостовых переходов. – Москва: Союздорнии, 1995. – 124 с.

42. Сравнительный анализ определения расхода топлива автомобиля с использованием расходомера DFL3X-5BAR и расчётным методом с помощью данных диагностического протокола OBD II / А. Н. Блохин, Ю. И. Молев, П. С. Мошков, А. Н. Тихомиров // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 21. – EDN VIDTFD.

43. Тарифы на проезд по платным дорогам ГК «Автодор» – URL: <https://avtodor-tr.ru/road/tariffs/> (дата обращения: 22.09.2023).

44. Трофименко, Ю. В. Инвентаризация выбросов загрязняющих веществ передвижными источниками дорожного транспорта : Учебное пособие для студентов направлений подготовки 23.05.01 – Наземные транспортно-технологические средства, 23.03.03 – Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов / Ю. В. Трофименко, В. И. Комков. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2023. – 114 с. – EDN EDWAXE.

45. Трофименко, Ю. В. Особенности методики и результаты оценки выбросов парниковых газов дорожным и внедорожным транспортом для

Национального доклада о кадастре антропогенных выбросов / Ю. В. Трофименко, В. М. Лытов // Химия и инженерная экология - XXV : сборник трудов международной научной конференции (школа молодых ученых), посвященной научному сотрудничеству России и дружественных стран, а также деятельности Академического союза «Зелёного» развития Ассоциации технических университетов России и Китая, Казань, 25–26 сентября 2025 года. – Казань: ИП Издательство Сагиев А.Р., 2025. – С. 335-338.

46. Трофименко, Ю. В. Транспортное планирование : формирование эффективных транспортных систем крупных городов / Ю. В. Трофименко, М. Р. Якимов. – Москва : Издательский дом "Логос Пресс", 2013. – 464 с. – ISBN 978-5-98704-709-5. – EDN RXRREL.

47. Усовершенствованная методика расчетного мониторинга выбросов парниковых газов от деятельности автомобильного и внедорожного транспорта в Российской Федерации / Ю. В. Трофименко, В. А. Гинзбург, А. Н. Якубович [и др.] // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2025. – Т. 28, № 1. – С. 78-96. – DOI 10.26467/2079-0619-2025-28-1-78-96. – EDN HLGHEZ.

48. Шагидуллин, А. Р. Методы и средства систем локального экологического мониторинга качества атмосферного воздуха высокоурбанизированных территорий на основе сквозных цифровых технологий : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Шагидуллин Артур Рифгатович. – Казань, 2023. – 649 с. – EDN LZCGNC.

49. Швецов В.И. Математическое моделирование загрузки транспортных сетей / В. И. Швецов, А.С. Алиев. –М.: URSS, 2003 –64 с. –ISBN 978-5-354-00385-3.

50. Энциклопедия решений. Учет горюче-смазочных материалов (для бюджетной сферы) (октябрь 2025) | ГАРАНТ [Электронный ресурс] // Информационный вебсайт. – Электрон. текст. и граф. дан. – URL: <https://base.garant.ru/58070212> (дата обращения: 11.11.2024)

51. Якимов, М. Р. Научная методология формирования эффективной транспортной системы крупного города : специальность 05.22.01 "Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Якимов Михаил Ростиславович. – Москва, 2011. – 418 с. – EDN QFZKIP.

52. Якимов, М. Р. Транспортное планирование: формирование эффективных транспортных систем крупных городов / М. Р. Якимов, Ю. В. Трофименко. – 2-е издание. – Пермь : Агентство РАДАР, 2022. – 536 с. – ISBN 978-5-6048401-0-8. – EDN IRPVVJ.

53. Якубович, А. Н. Использование геоинформационных технологий при анализе и прогнозировании экологического состояния территорий дорожной сети / А. Н. Якубович, И. А. Якубович // В мире научных открытий. – 2015. – № 6(66). – С. 52-63. – DOI 10.12731/wsd-2015-6-5. – EDN TVPVXZ.

54. Якубович, И. А. Погрешности в оценках объемов выбросов парниковых газов автотранспортом и способы их снижения / И. А. Якубович // Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта : Сборник научных трудов кафедры ЭАТиС, посвященный 90-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки и техники, д.т.н. профессора Евгения Семеновича Кузнецова по материалам 77-ой научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ, Москва, 29–30 января 2019 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Техполиграфцентр", 2019. – С. 127-130. – EDN YWVNUD.

55. Abgas-Emissionsfaktoren von Nutzenfahrzeugen in der BRD für das Bezugjahr 1990. / D. Hassel, P. Jost, F. J. Weber, F. Dursbeck, K. S. Sonnborn // TÜV Rheinland Sicherheit und Umweltschutz GmbH, VFO PLAN 10405151/02 - Berlin: Erich Schmidt, 1995. - 276 p.

56. Abgas-Emissionsfaktoren von Pkw in der Bundesrepublik Deutschland. Abgasemissionen von Fahrzeugen der Baujahre 1986 bis 1990. / D. Hassel, P. Jost, F. J. Weber, F. Dursbeck, K. S. Sonnborn, D. Plettau // TÜV Rheinland Sicherheit und

Umweltschutz GmbH, VFO PLAN 10405152 und 10405509. - Berlin: Erich Schmidt, 1994. - 333 p.

57. Aerodynamics of Road Vehicles. Fourth Edition. Edited by Wolf -Heinrich Hucho. SAE International, Warrendale 1998.

58. Consumption calculation of vehicles using OBD data/Adriano Alessandrini, Francesco Filippi, Fernando Ortenzi/-CTL, Centre For Transport and Logistics, University of Rome «La Sapienza».

59. COPERT Version 5 [Электронный ресурс] // Информационный вебсайт. – Электрон. Текст. и граф. дан. – URL: <http://emisia.com/products/copert/copert-5> (дата обращения: 09.09.2024).

60. Definition of perspective scheme of organization of traffic using methods of forecasting and modeling / V. M. Vlasov, A. N. Novikov, I. A. Novikov, A. G. Shevtsova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : Processing Equipment, Mechanical Engineering Processes and Metals Treatment, Tomsk, 04–06 декабря 2017 года. Vol. 327, 4. – Tomsk: Institute of Physics Publishing, 2018. – P. 042116. – DOI 10.1088/1757-899X/327/4/042116. – EDN UXOVHF.

61. Ev-auto. Запас хода электромобиля. Что такое оценочные ездовые циклы NEDC, JS08, EPA и WLTP. – URL: <https://ev-auto.ru/zapas-xoda-elektromobilya-ezdovye-cikly-nedc-js08-epa-i-wltp> (дата обращения 26.09.2022).

62. Global Technical Regulations (GTRs) | UNECE – URL: https://unece.org/transport/standards/transport/vehicle-regulations-wp29/global-technical-regulations-gtrs#jfmulticontent_c29896-15 (дата обращения 27.09.2022).

63. HBEFA - Handbook Emission Factors for Road Transport [Электронный ресурс] // Информационный вебсайт. – Электрон. текст. и граф. дан. – URL: <https://www.hbefa.net/> (дата обращения: 09.09.2024).

64. Inside EVs. Как считают запас хода электромобилей: NEDC, WLTP и EPA. – URL: <https://insideevs.ru/features/430886/kak-schitayut-zapas-khoda-elektromobilej-nedc-wltp-i-epa/> (дата обращения 30.09.2022).

65. Liang Y. Factors affecting transportation sector CO2 emissions growth in China: an LMDI decomposition analysis / Y. Liang, D. Niu, H. Wang, Y. Li // Sustainability. 2017. Vol. 9, iss. 10. ID: 1730. 10.3390/su9101730. DOI: [10.3390/su9101730](https://doi.org/10.3390/su9101730)
66. Mishalani R.G. Modeling the relationships among urban passenger travel carbon dioxide emissions, transportation demand and supply, population density, and proxy policy variables / R.G. Mishalani, P.K. Goel, A.M. Westra, A.J. Landgraf // Transportation Research. Part D. Transport Environment. 2014. Vol. 33. Pp. 146-154. DOI: [10.1016/j.trd.2014.08.010](https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.08.010)
67. Part 75 Policy and Technical Resources | US EPA – URL: <https://www.epa.gov/power-sector/part-75-policy> (дата обращения 26.09.2022).
68. 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. – EDN MFONWL.
69. Sovran G. Tractive Energy Based Formulae for Impact of Aerodynamics on Fuel Economy over the EPA-Driving Schedules // SAE Paper No. 830304, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa., 1983.
70. Toxicological evaluation of exhaust emissions from light-duty vehicles using different fuel alternatives in sub-freezing conditions / H. Hakkarainen, P. Aakko-Saksa, M. Sainio [et al.] // Particle and Fibre Toxicology. – 2020. – Vol. 17, No. 1. – P. 1-17. – DOI 10.1186/s12989-020-00348-0. – EDN JD0FII.
71. Traffic flow estimation with data from a video surveillance camera / A. Fedorov, K. Nikolskaia, S. Ivanov [et al.] // Journal of Big Data. – 2019. – Vol. 6, No. 1. – P. 73. – DOI 10.1186/s40537-019-0234-z. – EDN VUSOEP.
72. TREMOD Model [Электронный ресурс] // Информационный вебсайт. – Электрон. текст. и граф. дан. – URL: <https://www.ifeu.de/en/methods/models/tremod/> (дата обращения: 09.09.2024).

73. Trofimenko Yu.V., Komkov V.I. Forecast of decarbonization of road transport in Russia until 2050 in the context of digitalization and expansion of the use of unmanned vehicles // 2021 Intelligent technologies and electronic devices in vehicle and road transport complex (TIRVED). IEEE. 2021. DOI: [10.1109/TIRVED53476.2021.9639206](https://doi.org/10.1109/TIRVED53476.2021.9639206)

74. Trofimenko, Y. Forecast of energy consumption and greenhouse gas emissions by road transport in Russia up to 2050 / Y. Trofimenko, V. Komkov, K. Trofimenko // Transportation Research Procedia : 14, Saint Petersburg, 21–24 октября 2020 года. – Saint Petersburg, 2020. – P. 698-707. – DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.082. – EDN TWTQFQ.

75. Trofimenko, Y. V. Methodology for Predictive Estimation of Specific Greenhouse Gas Emissions by Traffic Flows / V.I. Komkov, D.A. Deianov, N.N. Fedotov // 2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), Moscow, 10–11 ноября 2022 года. – Moscow, 2022.

76. Trofimenko, Yu. V. Application of Risk Modeling to Assess the Effectiveness of Motor Transport Decarbonization / Yu. V. Trofimenko, T. Yu. Grigoreva, A. Yu. Chekanov // Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2023. – Vol. 6, No. 1. – P. 494-499. – DOI 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092041. – EDN DHWAEA.

77. UN Regulation No. 154 - Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure (WLTP) | UNECE – URL: <https://unece.org/transport/documents/2021/02/standards/un-regulation-no-154-worldwide-harmonized-light-vehicles-test> (дата обращения: 22.09.2024).

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ЕЗДОВЫЕ ЦИКЛЫ ОДИНОЧНЫХ ТС, ИМИТИРУЮЩИЕ УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

ГОСТ Р 54810-2011 распространяется на автомобильные транспортные средства категорий М с максимальной массой свыше 3,5 т, М2, М3, N2 и N3 по ГОСТ Р 52051 с двигателями с принудительным зажиганием или с воспламенением от сжатия и устанавливает методы испытаний. Стандарт не распространяется на автомобильные транспортные средства с гибридными силовыми установками, с двигателями, работающими на газообразном топливе, а также на автомобильные транспортные средства, не предназначенные для передвижения по дорогам общего пользования.

Методы испытаний АТС полной массой до 3,5 т данный ГОСТ предписывает проводить в соответствии с Правилами ЕЭК ООН №101 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, приводимых в движение только двигателем внутреннего сгорания, либо приводимым в движение при помощи гибридного электропривода, в отношении измерения объемов диоксида углерода и расхода топлива и или измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге, а также транспортных средств категорий М1 и N1, приводимых в движение только при помощи электропривода, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода на электротяге».

Согласно ГОСТ Р 54810-2011 «Автотранспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний» оценочными показателями топливной экономичности служат:

- расход топлива при заданных скоростях движения;
- расход топлива в магистральном цикле на дороге;
- расход топлива в городском цикле на дороге;
- топливная характеристика установившегося движения;
- контрольный расход топлива.

Расход топлива зависит от типа АТС и их максимальной скорости и устанавливается для скоростей движения: 40 и 60 км/ч для АТС категорий М3 и N3

класса 1; 60 и 80 км/ч – N2, N3, M2, M3 классов II, III; 90 и 120 км/ч — для АТС категории M1 максимальной массой свыше 3,5 т.

Режимы движения грузовых АТС и автобусов в магистральном, городском циклах, а также при установившемся движении устанавливаются в соответствии с ГОСТ 20306-90.

ГОСТ Р 41.84-99 [27] (Правила ЕЭК ООН N 84) «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения дорожных транспортных средств, оборудованных ДВС, в отношении измерения расхода топлива» распространяется на КТС групп M1 (пассажирские транспортные средства полной массой до 3,5 т) и N1 (грузовые транспортные средства полной массой не более 2 т). Транспортное средство подвергается испытаниям при следующих дорожных условиях: ездовой цикл, имитирующий движение в городе; движение с постоянной скоростью 90 км/ч; движение с постоянной скоростью 120 км/ч. Здесь также воспроизводятся режимы движения европейского ездового цикла, как и в ГОСТ 20306-90.

Нынешний европейский ездовой цикл NEDC - универсальный: его предписано применять как для оценки расхода топлива автомобилей M1 и N1 и определения расхода энергии и запаса хода у гибридов и электромобилей (Правило ECE R101), так и для определения токсичности отработавших газов по Правилу ECE R83. В основе методики - городской цикл ECER15 и загородный EUDC. В 1999 году по Директиве ЕС 90/C81/01 в программу испытаний была введена процедура холодного старта, тогда же цикл стал называться «новым».

Американский цикл FTP-75 кроме изменения скоростных и нагрузочных режимов предусматривает включение кондиционера (если он есть, цикл SC 03). Кроме того, ускорения при разгонах существенно выше, чем в цикле NEDC. Но движение КТС с постоянной скоростью отсутствует. За первые 505 секунд, так называемую фазу холодного старта, автомобиль успевает поехать в «городе» со скоростями до 56 км/ч, после небольшой «стоянки» выбраться на «интерстейт», разогнавшись там до 90 км/ч, а затем вновь возвращается в «городскую черту», но уже с более высокой разрешенной скоростью - до 60 км/ч. Затем следует

«переходная фаза» продолжительностью 864 секунды (там скорость не превышает 56 км/ч), а после десятиминутной передышки на охлаждение (двигатель выключается) повторяется «фаза холодного старта», но с «теплым» мотором. Общее время цикла - 1874 секунды, дистанция – 17,770 км, средняя скорость - 34,1 км/ч (немного выше, чем в Европе), но расход получается больше «европейского» на 15-30%.

В Японии расход топлива легковых ТС измеряли по циклу 10-15 mode, который был близок по режимам к городскому ездовому циклу ECER15. Плавные разгоны до 20 и 40 км/ч, поддержание постоянной скорости и плавные торможения. Только дважды за 11-минутный цикл автомобиль разгонялся до 70 км/ч. В настоящее время в Японии действует новый стандарт - JC08, который больше похож на американский FTP-75: автомобиль непрерывно разгоняется и тормозит, а максимальная скорость увеличена до 80 км/ч. Тем не менее данный цикл имитирует неторопливое вождение: средняя скорость на дистанции 8171 метр составляет всего 24,4 км/ч. Замеры делаются дважды, на холодном автомобиле и с прогретым двигателем. А итоговый расход топлива определяется как сумма 25% расхода в «холодном» цикле и 75% расхода в «горячем».[11]

Измерительный ездовой цикл, единый для всех мировых автопроизводителей — WLTC (Worldwide harmonized Light vehicles Test Cycle) заменил собой европейский NEDC, американский FTP-75 и японский JC08. У нового стандарта есть целый ряд преимуществ по сравнению с прежними. Скорости тут выше, а время остановок меньше, что приближает методику к реальности. Средняя скорость — 53,8 км/ч, а на остановки приходится лишь 13,4% времени (общая продолжительность испытаний — 30 минут). Разгоны более интенсивные: до 1,58 м/с². Максимальная скорость тоже выше, чем в других циклах - до 131,3 км/ч. Переводить АКПП во время теста в «экорезим» будет разрешено только в тех случаях, когда автопроизводитель способен подтвердить, что этот режим можно использовать в качестве основного.

Лабораторным испытаниям предшествуют тесты на полигоне (для определения сопротивления качению и «обтекаемости»), и к ним предъявляются

более жесткие требования. Автопроизводители не могут по своему усмотрению выбирать наиболее выгодное оснащение автомобиля. Требования предполагают использование комплектации, обеспечивающей максимальное сопротивление качению. Так, применение изношенных шин считается нарушением: износ протектора не должен превышать 20%. Также цикл WLTC позволяет более корректно оценить энергопотребление электромобилей и гибридов.

Ранее используемый цикл NEDC реальную манеру вождения и дорожные условия учитывает с большими погрешностями. Например, на разгон до 50 км/ч отводится 15 секунд. Преодоление крутых подъемов не предусмотрено. Тем не менее масштабные тесты, которые проводила, например, ADAC (немецкая общественная организация автомобилистов) по новой методике (WLTP), доказали, что она дает значительно более правдоподобные результаты по сравнению с ездовыми циклами NEDC, FTP-75 или JC08.

Измерительный цикл New European Driving Cycle (NEDC) используется для определения тягово-динамических показателей, расхода топлива и выбросов загрязняющих веществ с 2000-го года (рисунок А1 и таблица А1).

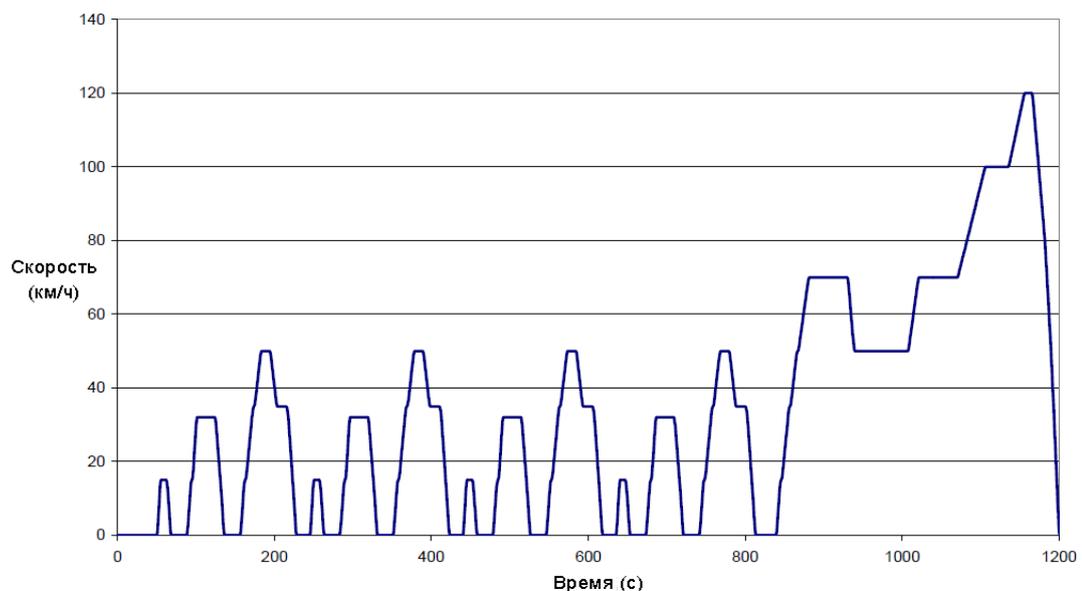


Рисунок А1 – График изменения скорости движения по циклу NEDC

Таблица А1 – Характеристика ездового цикла NEDC

Продолжительность цикла, с	Доля времени остановок, %	Максимальная скорость, км/ч	Средняя скорость*, км/ч	Максимальное ускорение, м/с ²
1180	24,8	120	44,7	0,83

* Без учета остановок

Четыре участка по 195 секунд объединены в один блок Urban Driving Cycle, призванный симулировать езду по городу (рисунок А2). Средняя скорость на одном таком участке составляет 18,7 км/ч.

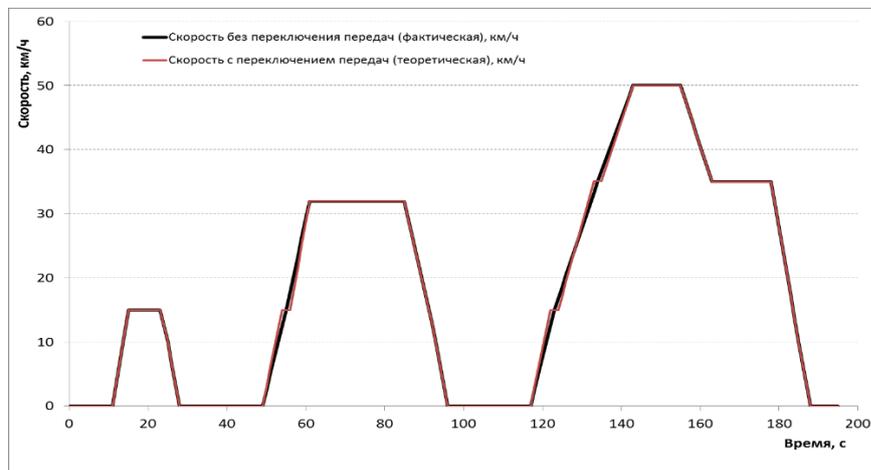


Рисунок А2 – Европейский городской ездовой цикл (NEDC Urban)

Езду по загородной трассе включает в себя блок под названием Extra Urban Driving Cycle (рисунок А3), измерения в данном блоке длятся 400 секунд. Автомобиль достигает максимальной скорости в 120 км/ч; а средняя скорость составляет ≈ 63 км/ч.

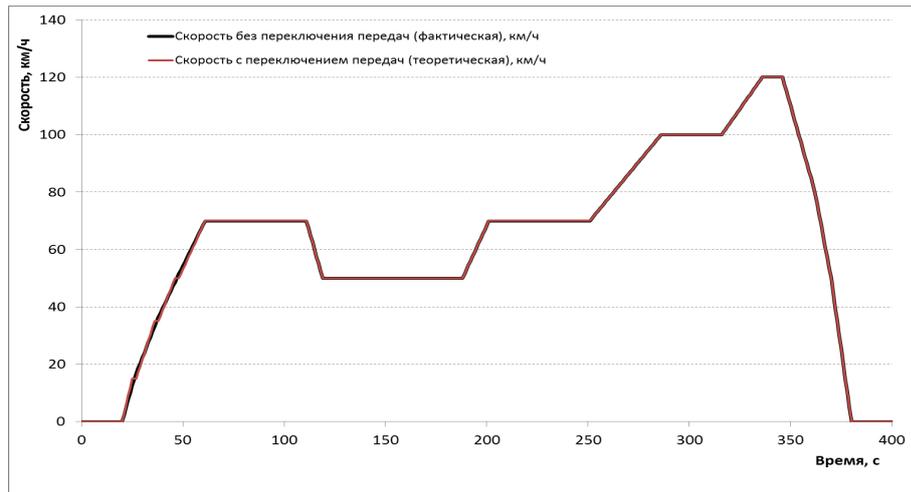


Рисунок А3 – Европейский загородный ездовой цикл (NEDC Extra Urban)

Данный измерительный цикл характеризуется достаточно медленными разгонами: 26 секунд дается на разгон от 0 до 50 км/ч и 41 секунду можно набирать скорость от 0 до 70 км/ч. Для измерений расхода электроэнергии на тягу по данному циклу приходится отказываться от обогрева салона и сидений, мультимедиа, стеклоочистители и освещение также не работает.

Измерительный цикл Environmental Protection Agency Federal Test Procedure 75 (EPA или FTP-75) [14]. FTP-75 и EPA два разных названия одного протокола измерений и моделирования движения ТС (рисунок А4 и таблица А2).

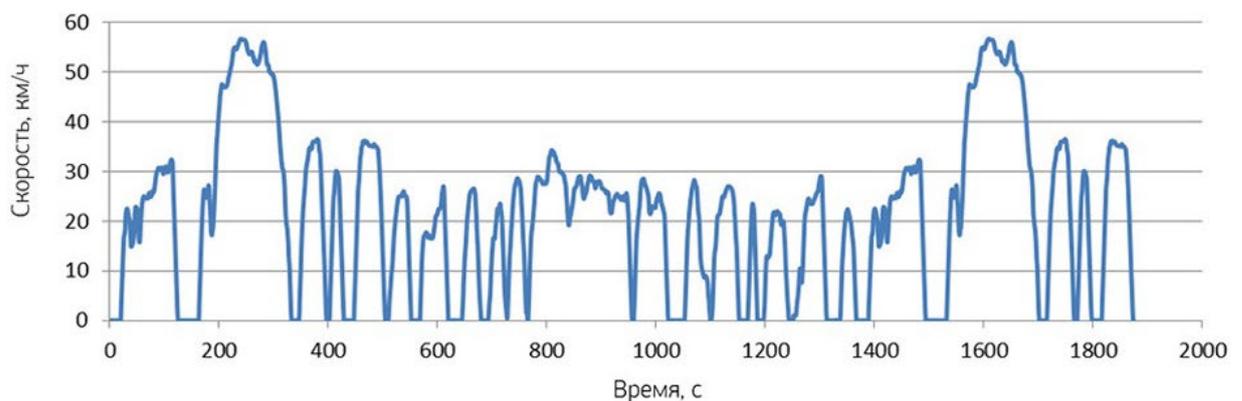


Рисунок А4 – График изменения скорости по циклу EPA.

Таблица А2 – Характеристика ездового цикла ЕРА

Продолжительность цикла, с	Доля времени остановок, %	Максимальная скорость, км/ч	Средняя скорость*, км/ч	Максимальное ускорение, м/с ²
1876	19,6	91,3	42,4	1,48

Примечание: * Без учета остановок

Условия измерений по циклу ЕРА (FTP-75) наиболее приближены к реальным условиям эксплуатации. В данной процедуре оценки тягово-динамических, энергетических и экологических показателей ТС предусмотрены несколько дополнительных циклов, которые призваны отразить реальную картину при измерении запаса хода:

- US06 создан для симуляции энергичной езды по городу. Большое количество остановок, с последующим достаточно резким набором скорости характерны для данного цикла;
- SC03 данный цикл подразумевает езду с включенным кондиционером. Что безусловно сказывается на потреблении энергии и, соответственно, на запасе хода.

Циклы испытаний (WLTC) представляют собой динамометрические испытания автомобиля для тягово-динамических качеств, расхода топлива и выбросов загрязняющих веществ транспортных средств полной массой менее 3,5 т. Процедура испытаний была разработана группой ЕЭК ООН (Рабочая группа по загрязнению и энергетике). Циклы WLTC являются частью Всемирных согласованных процедур испытаний легких транспортных средств (WLTP) в качестве Глобальных технических правил № 15 ЕЭК ООН (ГТП 15) [8]. Хотя аббревиатуры WLTP и WLTC иногда используются взаимозаменяемо, процедуры WLTP определяют ряд других процедур – в дополнение к циклам испытаний WLTC – которые необходимы для утверждения типа транспортного средства.

Процесс замены NEDC на WLTP при испытаниях ТС начался в 2017 году. Процедуры WLTP включают несколько циклов испытаний WLTC, применимых к

категориям транспортных средств с различным соотношением мощности к массе (PMR) (таблица А3 и рисунок А5). Подавляющее большинство электромобилей и гибридов относятся к 3-му классу.

Таблица А3 – Категории ТС по WLTP

Категория	PMR, Вт/кг	Макс. скорость, км/ч	Последовательность фаз
Класс 3b	PMR > 34	≥ 120	Low 3 + Medium 3-2 + High 3-2 + Extra High 3
Класс 3a		< 120	Low 3 + Medium 3-1 + High 3-1 + Extra High 3
Класс 2	34 ≥ PMR > 22	-	Low 2 + Medium 2 + High 2 + Extra High 2
Класс 1	PMR ≤ 22	-	Low 1 + Medium 1 + Low 1

Параметр PMR определяется как отношение номинальной мощности (Вт) / снаряженной массы (кг).

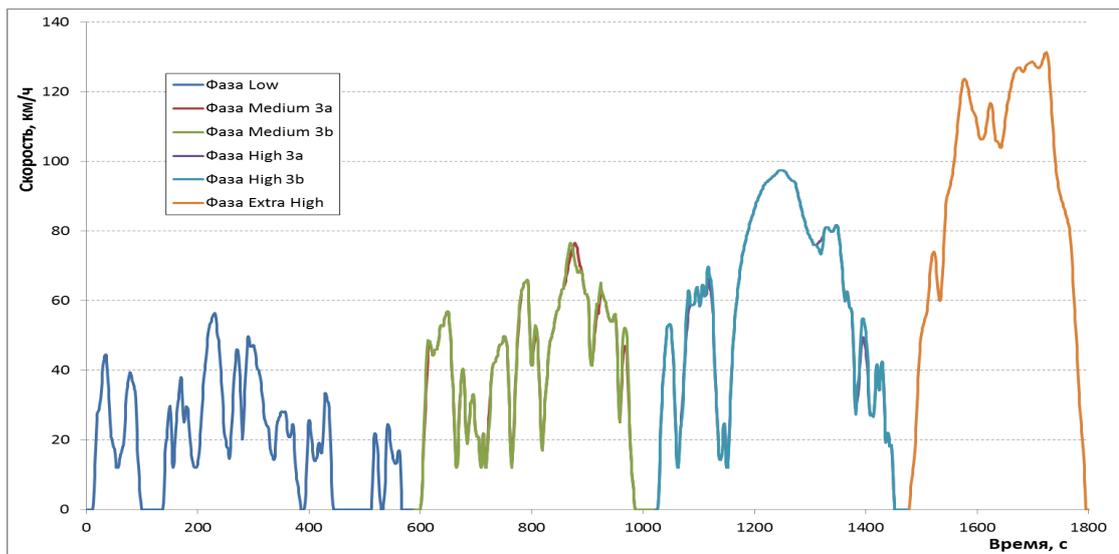


Рисунок А5 – Всемирно согласованный смешанный ездовой цикл (WLTC Combined) для испытаний транспортных средств 3 класса

В таблице А4 приведены характеристики WLTP для 3 класса ТС.

Таблица А4 – Параметры цикла WLTP для 3 класса ТС

Фаза	Длительность	Длительность остановки	Дистанция	Макс. скорость	Средняя скорость	Минимальное ускорение	Максимальное ускорение
	с	с					
Low	589	156	3095	56.5	25.7	-1.47	1.47
Medium	433	48	4756	76.6	44.5	-1.49	1.57
High	455	31	7162	97.4	60.8	-1.49	1.58
Extra-High	323	7	8254	131.3	94.0	-1.21	1.03
Итого	1800	242	23266				

На рисунке А6 приведены графики изменения скоростных режимов ТС электромобилей и гибридов в цикле WLTP для городских условий (WLTC City).

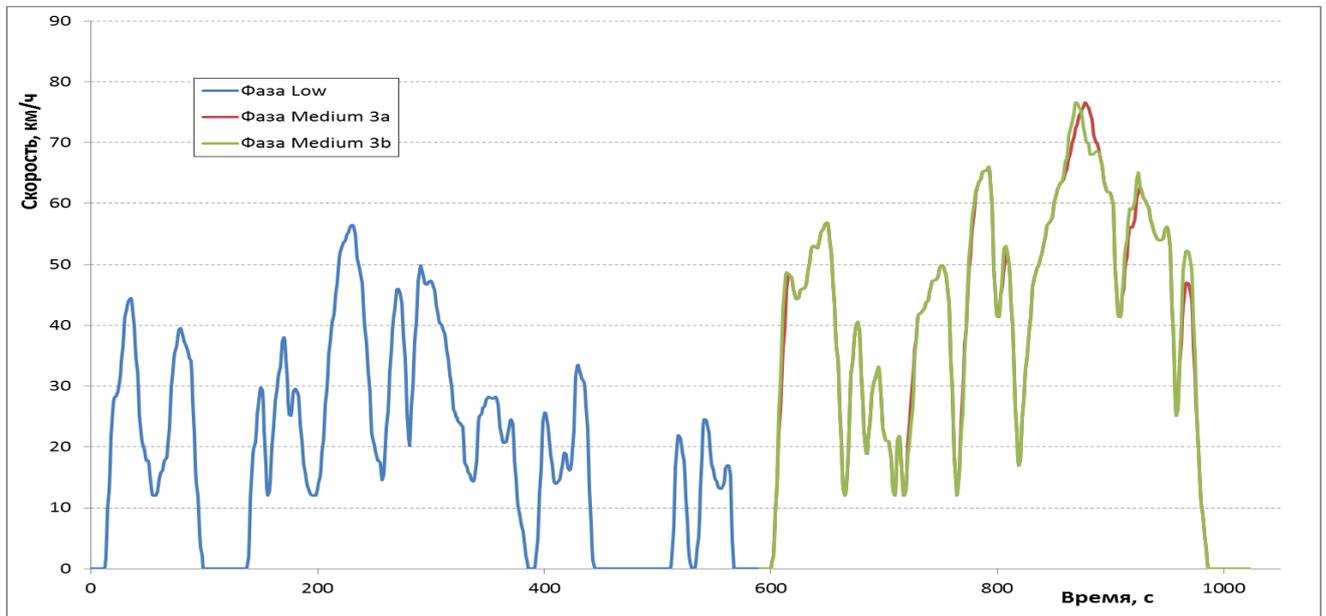


Рисунок А6 – Всемирно согласованный городской ездовой цикл (WLTC City)

Ограничения при испытаниях ТС по ездовому циклу WLTP:

- измерения должны проводиться в комплектации, обеспечивающей наибольшее сопротивление движению;
- спойлеры, антикрылья, жалюзи радиаторов должны быть настроены под обычную, ежедневную езду;
- остаточная глубина канавок протектора должна составлять не менее 80% глубины протектора новой шины;
- экорежимы для машин с автоматическими трансмиссиями, во время измерений, допустимо включать только если данный режим может использоваться как основной;

Особенностью данного цикла является то, что нет ни одного участка, где автомобиль движется с постоянной скоростью. В сравнении с остальными тремя измерительными циклами WLTP имеет наименьшее время остановок и самую высокую среднюю скорость.

Для пересчета значений расхода топлива одиночных КТС фирма InsideEVs [9] рекомендует использовать следующие коэффициенты пересчета - значения расхода энергии одних и тех же ТС в цикле ЕРА в 1,43 раза больше, чем в цикле NEDC (погрешность оценок 11%). Значения расхода энергии на тягу в цикле WLTP в 1,12 раза больше, чем в цикле NEDC (погрешность - 8%).

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АТС ПО СЦЕНАРИЯМ

Таблица Б1 – Базовый вариант сценария

Базовый Вариант 2024					
№ п/п	Класс АТС	Количество ТС	№ п/п	Класс АТС	Количество ТС
1	Mini (б)	69328	17	N2 (б)	3315
2	Mini (д)	2145	18	N2 (д)	62998
3	Mini (г)	985	19	N2 (г)	1195
4	Small (б)	271601	20	N3 (б)	256
5	Small (д)	14289	21	N3 (д)	85885
6	Small (г)	3942	22	N3 (г)	2300
7	Medium (б)	1458103	23	Грузовые электромобили	94
8	Medium (д)	161938	24	M2 (б)	1001
9	Medium (г)	22336	25	M2 (д)	19024
10	Large (б)	336154	26	M2 (г)	1168
11	Large (д)	68857	27	M3 (б)	32
12	Large (г)	5584	28	M3 (д)	16097
13	Легковые электромобили	16781	29	M3 (г)	1329
14	N1 (б)	47283	30	Электробусы	2431
15	N1 (д)	110382	31	Тролейбусы	3
16	N1 (г)	5468	32	Трамваи	550

Таблица Б2 – Сценарий «Электрификация автомобильного транспорта» на 2028 расчетный год

Электрификация автомобильного транспорта 2028					
№ п/п	Класс АТС	Количество ТС	№ п/п	Класс АТС	Количество ТС
1	Mini (б)	69328	17	N2 (б)	3315
2	Mini (д)	2145	18	N2 (д)	62998
3	Mini (г)	985	19	N2 (г)	1195
4	Small (б)	271601	20	N3 (б)	56
5	Small (д)	14289	21	N3 (д)	65885
6	Small (г)	3942	22	N3 (г)	2300
7	Medium (б)	1400051	23	Грузовые электромобили	1200
8	Medium (д)	156860	24	M2 (б)	1001

Продолжение таблицы Б2

9	Medium (г)	22336	25	M2 (д)	19024
10	Large (б)	336154	26	M2 (г)	1168
11	Large (д)	68857	27	M3 (б)	32
12	Large (г)	5584	28	M3 (д)	11097
13	Легковые электромобили	96536	29	M3 (г)	1329
14	N1 (б)	47283	30	Электробусы	9900
15	N1 (д)	110382	31	Тролейбусы	3
16	N1 (г)	5468	32	Трамваи	550

Таблица Б3 – Сценарий «Электрификация автомобильного транспорта» на 2029 расчетный год

Электрификация автомобильного транспорта 2029

№ п/п	Класс АТС	Количество ТС	№ п/п	Класс АТС	Количество ТС
1	Mini (б)	59328	17	N2 (б)	3315
2	Mini (д)	2145	18	N2 (д)	62998
3	Mini (г)	985	19	N2 (г)	1195
4	Small (б)	261601	20	N3 (б)	56
5	Small (д)	14289	21	N3 (д)	65885
6	Small (г)	3942	22	N3 (г)	2300
7	Medium (б)	1382451	23	Грузовые электромобили	1200
8	Medium (д)	156860	24	M2 (б)	1001
9	Medium (г)	22336	25	M2 (д)	19024
10	Large (б)	336154	26	M2 (г)	1168
11	Large (д)	68857	27	M3 (б)	32
12	Large (г)	5584	28	M3 (д)	11097
13	Легковые электромобили	133136	29	M3 (г)	1329
14	N1 (б)	47283	30	Электробусы	10900
15	N1 (д)	110382	31	Тролейбусы	3
16	N1 (г)	5468	32	Трамваи	550

Таблица Б4 – Сценарий «Электрификация автомобильного транспорта» на 2030 расчетный год

Электрификация автомобильного транспорта 2030

№ п/п	Класс АТС	Количество ТС	№ п/п	Класс АТС	Количество ТС
1	Mini (б)	59328	17	N2 (б)	3315

Продолжение таблицы Б4

2	Mini (д)	2145	18	N2 (д)	62998
3	Mini (г)	985	19	N2 (г)	1195
4	Small (б)	261601	20	N3 (б)	56
5	Small (д)	14289	21	N3 (д)	65885
6	Small (г)	3942	22	N3 (г)	2300
7	Medium (б)	1332351	23	Грузовые электромобили	1357
8	Medium (д)	156860	24	M2 (б)	1001
9	Medium (г)	22336	25	M2 (д)	19024
10	Large (б)	336154	26	M2 (г)	1168
11	Large (д)	68737	27	M3 (б)	32
12	Large (г)	5584	28	M3 (д)	11097
13	Легковые электромобили	182386	29	M3 (г)	1329
14	N1 (б)	47283	30	Электробусы	11713
15	N1 (д)	110382	31	Тролейбусы	3
16	N1 (г)	5468	32	Трамваи	550

Таблица Б5 – Сценарий «Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)» на 2028 расчетный год

**Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)
2028**

№ п/п	Класс АТС	Количество ТС	№ п/п	Класс АТС	Количество ТС
1	Mini (б)	69328	17	N2 (б)	3315
2	Mini (д)	2145	18	N2 (д)	62998
3	Mini (г)	985	19	N2 (г)	1195
4	Small (б)	271601	20	N3 (б)	256
5	Small (д)	14289	21	N3 (д)	85885
6	Small (г)	3942	22	N3 (г)	2300
7	Medium (б)	1448103	23	Грузовые электромобили	94
8	Medium (д)	161918	24	M2 (б)	1001
9	Medium (г)	22336	25	M2 (д)	25024
10	Large (б)	316154	26	M2 (г)	5168
11	Large (д)	68857	27	M3 (б)	32
12	Large (г)	5584	28	M3 (д)	26097
13	Легковые электромобили	16781	29	M3 (г)	7329
14	N1 (б)	47283	30	Электробусы	6431
15	N1 (д)	110382	31	Тролейбусы	3
16	N1 (г)	5468	32	Трамваи	570

Таблица Б6 – Сценарий «Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)» на 2029 расчетный год

Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) 2029					
№ п/п	Класс АТС	Количество ТС	№ п/п	Класс АТС	Количество ТС
1	Mini (б)	69328	17	N2 (б)	3315
2	Mini (д)	2145	18	N2 (д)	62998
3	Mini (г)	985	19	N2 (г)	1195
4	Small (б)	271601	20	N3 (б)	256
5	Small (д)	14289	21	N3 (д)	85885
6	Small (г)	3942	22	N3 (г)	2300
7	Medium (б)	1402993	23	Грузовые электромобили	94
8	Medium (д)	161918	24	M2 (б)	1001
9	Medium (г)	22336	25	M2 (д)	33724
10	Large (б)	306144	26	M2 (г)	19968
11	Large (д)	68657	27	M3 (б)	32
12	Large (г)	5584	28	M3 (д)	36097
13	Легковые электромобили	16781	29	M3 (г)	27929
14	N1 (б)	47283	30	Электробусы	7631
15	N1 (д)	110382	31	Тролейбусы	3
16	N1 (г)	5468	32	Трамваи	590

Таблица Б7 – Сценарий «Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП)» на 2030 расчетный год

Переход на пассажирский транспорт общего пользования (ПТОП) 2030					
№ п/п	Класс АТС	Количество ТС	№ п/п	Класс АТС	Количество ТС
1	Mini (б)	69328	17	N2 (б)	3315
2	Mini (д)	2145	18	N2 (д)	62998
3	Mini (г)	985	19	N2 (г)	1195
4	Small (б)	271601	20	N3 (б)	256
5	Small (д)	14289	21	N3 (д)	85885
6	Small (г)	3942	22	N3 (г)	2300
7	Medium (б)	1350993	23	Грузовые электромобили	94
8	Medium (д)	164898	24	M2 (б)	1001
9	Medium (г)	22336	25	M2 (д)	46324
10	Large (б)	301544	26	M2 (г)	31968
11	Large (д)	68657	27	M3 (б)	32

Продолжение таблицы Б7

12	Large (г)	5584	28	М3 (д)	55097
13	Легковые электромобили	16781	29	М3 (г)	36929
14	N1 (б)	47283	30	Электробусы	8631
15	N1 (д)	110382	31	Тролейбусы	3
16	N1 (г)	5468	32	Трамваи	610

ПРИЛОЖЕНИЕ В. АКТЫ О ВНЕДРЕНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ.



**ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ АВТОМОБИЛЬНОГО
ТРАНСПОРТА»
(ОАО «НИИАТ»)**

125480, г. Москва, ул. Героев Панфиловцев, д.24
Тел.: (495) 496-55-23, email: info@niiat.ru
www.niiat.ru

23.01.2026 № 0132-04/34a

на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ОАО «НИИАТ»



В.В. Машков

» января 2026 г.

А К Т

об использовании результатов диссертационной работы

Деянова Дениса Александровича на тему «Методика оценки энерго-экологической эффективности транспортных потоков на улично-дорожной сети крупного города», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.9.1 Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте

Диссертационная работа Деянова Дениса Александровича на тему: «Методика оценки энерго-экологической эффективности транспортных потоков на улично-дорожной сети крупного города», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.9.1 Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте, является актуальной и подчеркивает необходимость мониторинга расхода топлива и выбросов парниковых газов транспортными потоками на УДС крупных городов.

Основные научные положения (база данных состоящая из 3000 моделей одиночных колесных транспортных средств, содержащая их основные технико-эксплуатационные показатели; регрессионные зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления в зависимости от типа кузова и года выпуска транспортного средства; регрессионные зависимости базового расхода топлива (энергии) сгруппированных по виду используемого топлива транспортных средств от комплексного показателя К), приведенные в диссертационной работе Деянова Д.А., использованы Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский

институт автомобильного транспорта» (ОАО «НИИАТ») при выполнении научно-исследовательской работы по заказу Минтранса России на тему: «Подготовка научно обоснованных предложений по оценке эффективности решений, принимаемых в комплексных схемах организации дорожного движения и проектах автоматизированных систем управления дорожным движением, на основе данных энергопотребления отдельных транспортных средств в эксплуатации и математического моделирования энергопотребления транспортных потоков. Разработка предложений по нормативному и методическому обеспечению использования программных продуктов при расчете энергопотребления отдельных транспортных средств и проектировании в сфере организации дорожного движения с учетом энергопотребления транспортных потоков» (Государственный контракт № 0173100013921000013 от 26.07.2021).

Одна из разработанных Деяновым Д.А. методик и компьютерных программ (методика расчета расхода электроэнергии колесных транспортных средств с приводом от электродвигателей) использовалась для установления базовых норм расхода электроэнергии 46 марок легковых автомобилей с тяговым электроприводом. Полученные расчетные значения соответствующих норм для конкретных марок электромобилей внесены в текст Распоряжения 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» (введен распоряжением Минтранса России от 30.09.2021 № ВД-196-р, приложение № 7.3. Легковые автомобили отечественные и зарубежные с тяговым электроприводом).

Первый заместитель генерального
директора ОАО «НИИАТ» по научной
работе, кандидат технических наук,
доцент



В.В. Комаров



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
 федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
**«МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
 ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (МАДИ)»**

Россия, 125319, Москва, Ленинградский просп., 64.
 Тел. (499) 346-01-68 доб. 12-00, факс (499) 151-89-65. Интернет: <http://www.madi.ru>. E-mail: info@madi.ru



УТВЕРЖДАЮ
 Первый проректор - проректор
 по образовательной деятельности
 И.А. Артемьев
 «24» января 2026 г.

А К Т

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
 Деянова Дениса Александровича

Результаты диссертационного исследования Деянова Д.А. «Методика оценки энерго-экологической эффективности транспортных потоков на улично-дорожной сети крупного города» внедрены в учебный процесс МАДИ и используются при подготовке бакалавров по направлению 20.03.01 «Техносферная безопасность» (профиль «Инновационные экотехнологии и комплексная безопасность транспортных систем») и магистров по направлению 20.04.01 «Техносферная безопасность» (профиль «Инновационные экотехнологии и комплексная безопасность транспортных систем»).

Материалы, разработанные Деяновым Д.А., включены в курсы лекций и лабораторно-практические работы по учебным дисциплинам «Цифровизация и современные технологии инженерной защиты окружающей среды», «Научно-исследовательская работа», «Улучшение энергоэкологических характеристик машин» для бакалавров, «Комплексная оценка воздействия объектов ДТК на экосистемы разных уровней» для магистров.

Использование результатов диссертационного исследования рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Инженерно-экологические инновации и комплексная безопасность» (протокол №5 от «29» января 2026 г.)

Директор дорожно-строительного
 института

В.С. Надеждин

Зам. зав. кафедры «Инженерно-
 экологические инновации и
 комплексная безопасность»

Т.Ю. Григорьева