

ТРАНСПОРТ

Научная статья
УДК 656.072

<https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-2-43>

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ, ОБСЛУЖИВАЮЩИХ МАРШРУТЫ ГОРОДСКОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА

Д. А. Дрючин¹, Н. Н. Якунин², Н. В. Якунина³

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

¹ e-mail: dmi-dryuchin@yandex.ru

² e-mail: yakunin-n@yandex.ru

³ e-mail: nat.yakunina56@yandex.ru

Аннотация. Городской пассажирский транспортный комплекс – это комплекс видов транспорта и инфраструктурных объектов, объединённых единой целью – удовлетворение транспортных потребностей городского населения с заданными показателями качества. Комплекс является важнейшей частью инфраструктуры современных городов и обеспечивает выполнение ряда ключевых функций. Условием эффективной работы транспортного комплекса является сбалансированное развитие подсистем, входящих в его структуру, что в свою очередь обуславливает необходимость формирования методической базы, определяющей условия такого развития.

Исходя из обозначенных положений, сформулирована цель проводимого исследования, которая заключается в повышении эффективности эксплуатации транспортных средств, обслуживающих маршруты городского наземного пассажирского транспортного комплекса, на основе результатов оценки их экологической безопасности и энергетической эффективности.

Для достижения поставленной цели необходимо решение ряда задач:

- изучение и анализ содержания научно-исследовательских работ, нормативных и технических документов в области оценки экологической безопасности энергетической эффективности транспортных средств;
- разработка методики оценки и сравнительного анализа экологической безопасности и энергетической эффективности транспортных средств, обслуживающих маршруты городского общественного транспорта;
- оценка экологической безопасности различных категорий транспортных средств, обслуживающих маршруты городского наземного пассажирского транспортного комплекса;
- обобщение и анализ полученных результатов, формулирование выводов и практических рекомендаций.

При проведении исследования использован подход, предполагающий: моделирование параметров энергопотребления транспортных средств, реализующих различные технологии топливно-энергетического обеспечения и сравнительную оценку показателей, определяющих их энергоэффективность и экологическую безопасность в условиях движения по городским пассажирским маршрутам. Исходя из реализуемого подхода, в работе применены методы системного и статистического анализа исходной информации, математического моделирования и методы многокритериальной оценки полученных результатов.

Основным результатом исследования являются численные значения показателей энергоэффективности и экологической безопасности транспортных средств, реализующих различные технологии топливно-энергетического обеспечения в условиях городского наземного пассажирского транспортного комплекса, что составляет научную новизну выполненного исследования.

Использование полученных значений при оценке эффективности перевозки пассажиров транспортными средствами различных категорий, позволяет обеспечить формирование парка транспортных средств на основе результатов многокритериального анализа.

Одним из направлений дальнейших исследований, предполагающих использование полученных результатов, является разработка комплексной методики определения оптимальной структуры и согласованного формирования подсистем, входящих в состав городского наземного пассажирского транспортного комплекса.

Ключевые слова: энергоэффективность, экологическая безопасность, пассажирские перевозки, городской пассажирский транспорт, топливно-энергетическое обеспечение, транспортные средства.

Для цитирования: Дрючин Д. А., Якунин Н. Н., Якунина Н. В. Оценка экологической безопасности и энергетической эффективности транспортных средств, обслуживающих маршруты городского наземного транспортного комплекса // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2024. – № 2. – С. 43–55. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-2-43>.

Original article

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL SAFETY AND ENERGY EFFICIENCY OF VEHICLES SERVING THE ROUTES OF THE URBAN GROUND TRANSPORT COMPLEX

D. A. Dryuchin¹, N. N. Yakunin², N. V. Yakunina³

Orenburg State University, Orenburg, Russia

¹ e-mail: dmi-dryuchin@yandex.ru

² e-mail: yakunin-n@yandex.ru

³ e-mail: nat.yakunina56@yandex.ru

Abstract. *The urban passenger transport complex is the most important part of the infrastructure of modern cities and provides a number of key functions. The condition for the effective operation of the transport complex is the balanced development of the subsystems included in its structure, which in turn necessitates the formation of a methodological framework that determines the conditions for such development.*

Based on the indicated provisions, the purpose of the study is formulated, which is to increase the efficiency of the operation of vehicles serving the routes of the urban ground passenger transport complex, based on the results of an assessment of their environmental safety and energy efficiency.

To achieve this goal, it is necessary to solve a number of tasks:

- *study and analysis of the content of research papers, regulatory and technical documents in the field of environmental safety assessment of energy efficiency of vehicles;*
- *development of a methodology for assessing and comparative analysis of environmental safety and energy efficiency, vehicles serving urban public transport routes;*
- *assessment of environmental safety of various categories of vehicles serving the routes of the urban ground passenger transport complex;*
- *generalization and analysis of the results obtained, formulation of conclusions and practical recommendations.*

During the study, an approach was used that assumes: modeling of energy consumption parameters of vehicles implementing various technologies of fuel and energy supply and a comparative assessment of indicators determining their energy efficiency and environmental safety in traffic conditions on urban passenger routes. Based on the implemented approach, the methods of system and statistical analysis of the initial information, mathematical modeling and methods of multi-criteria evaluation of the results are used in the work.

The main result of the study is the numerical values of the indicators of energy efficiency and environmental safety of vehicles implementing various technologies of fuel and energy supply in the conditions of urban ground passenger transport complex, which is the scientific novelty of the study.

The use of the obtained values in assessing the efficiency of passenger transportation by vehicles of various categories allows for the formation of a fleet of vehicles based on the results of a multi-criteria analysis.

One of the directions of further research involving the use of the results obtained is the development of a comprehensive methodology for determining the optimal structure and coordinated formation of subsystems that make up the urban ground passenger transport complex.

Key words: *energy efficiency, environmental safety, passenger transportation, urban passenger transport, fuel and energy supply, vehicles.*

Cite as: Dryuchin, D. A., Yakunin, N. N., Yakunina, N. V. (2024) [Assessment of environmental safety and energy efficiency of vehicles serving the routes of the urban ground transport complex]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 2, pp. 43–55. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2024-2-43>.

Введение

Городской пассажирский транспортный комплекс – это комплекс видов транспорта и инфраструктурных объектов, объединённых единой целью – удовлетворение транспортных потребностей городского населения с заданными показателями качества. Многогранная роль городского пассажирского транспортного комплекса определяется рядом выполняемых функций, к числу которых относятся: удовлетворение транспортных потребностей всех слоёв населения, в том числе лиц с ограниченными возможностями, старшее поколение, молодежь и другие слои населения, которые не могут водить или приобрести в собственность автомобиль. Городской пассажирский транспорт способствует развитию экономики городских территорий, предоставляя удобные способы транспортировки для персонала и увеличивая доступность мест работы и бизнес-объектов. Групповой характер перевозок способствует кратному уменьшению загруженности улично-дорожной сети, уменьшению транспортных заторов на городских улицах. Следствием снижения интенсивности городского движения является уменьшение потребления различных видов топлив, основу которых составляют невозобновляемые углеводородные энергоносители. Снижение потребления углеводородов приводит к соответствующему уменьшению образования продуктов сгорания, включающих в свой состав токсичные компоненты и парниковые газы. Наибольшая эффективность обозначенных тенденций проявляется при согласованном формировании структурных параметров транспортного комплекса, создающего условия для эффективного внедрения современных технологий топливно-энергетического обеспечения, представляющих высокую эффективность использования энергоресурсов и снижение отрицательного воздействия на окружающую среду.

Под термином «топливно-энергетическое обеспечение» понимается совокупность взаимосвязанных технологических процессов и связанных с ними методов, обеспечивающих доставку энергоносителя на борт транспортного средства, его хранение и преобразование с целью последующего преобразования в механическую энергию.

Обзор литературы по теме исследования

Проблемы повышения экологической безопасности и энергетической эффективности транспортных средств, в том числе, транспортных средств, обслуживающих маршруты городского наземного транспортного комплекса, тесно взаимосвязаны между собой и, в той или иной степени, рассмотрены в работах, посвящённых применению альтернативных видов топлив и источников энергии. Как правило, альтерна-

тивная транспортная энергетика формируется, исходя из применения альтернативного энергоносителя в совокупности с разработанной инновационной технологией его применения.

Обычно, в качестве альтернативы традиционным углеводородным топливам нефтяного происхождения, для транспортных средств, обслуживающих маршруты городского пассажирского транспорта, рассматриваются углеводородные газообразные топлива (метан) и электроэнергия. Следует отметить, что электричество целесообразно рассматривать не как самостоятельный вид энергии, а как способ её передачи от стационарной энергетической установки.

Исследованиям в области применения углеводородных газовых топлив на автомобильном транспорте посвящены труды Е. В. Бондаренко, Е. Г. Григорьева, В.И. Ерохова, Б. Д. Колубаева, В. Льотко, В. Н. Луканина, Н. Г. Певнева, А. С. Тищенко, А. С. Хачияна, и других авторов [5; 6; 9; 15; 16; 22]. В работах этих исследователей рассмотрены технико-экономические, технологические и экологические аспекты применения углеводородных газов в качестве автомобильных топлив.

Вопросам применения электроэнергии на автомобильном транспорте и решению проблем, связанных с формированием электротранспортных систем, посвящены труды Д. В. Капского, О. А. Михалева, А. А. Штанга [4; 22].

Исходя из единства экологических и энергетических аспектов эксплуатации транспортных средств, при проведении литературного обзора рассмотрены научные труды и нормативные документы в области транспортной экологии. К числу таких работ относятся труды В. К. Азарова, М. А. Арсланова, А. Аслама (A. Aslam), Е. В. Бондаренко, А. В. Васильева, С. Ву (S. Wu), В. В. Донченко, А. А. Ипатов, Ю. И. Кунина, В. Ф. Кутенева, В. Н. Ложкина, О. В. Ложкиной, А. В. Рузского, И. Ф. Сулейманова, П. Трипати (P. Tripathi), Ю. В. Трофименко, А. А. Филиппова, Н. А. Хрипача, В. Н. Щербакова, М. Р. Якимова и других авторов [2; 7; 8; 11; 12; 13; 14; 18; 19; 20; 23; 24; 25; 26; 27; 28].

Вопросам экономической оценки экологического ущерба посвящены труды Л. Л. Абржиной, В. К. Азарова, А. И. Артемникова, Е. Р. Магарил, О. Е. Медведевой, В. Ф. Кутенева [1; 3; 10].

По результатам литературного обзора можно сделать предварительный вывод о том, что, несмотря на значительный объём проведённых исследований, отсутствует систематизированная информация, позволяющая сравнить энергетические характеристики и экологические показатели практического применения различных источников энергии и связанных с ними технологий топливно-энергетического обес-

печения в рамках локальных транспортных систем.

Исходя из обозначенной проблемы, сформулирована цель исследования – повышение эффективности эксплуатации транспортных средств, обслуживающих маршруты городского наземного пассажирского транспортного комплекса, на основе результатов оценки их экологической безопасности и энергетической эффективности.

Теоретическая часть

Загрязнение воздушного бассейна является наиболее

значимой составляющей экологического ущерба, связанного с эксплуатацией транспортных средств. Влияние транспорта на атмосферный воздух определяется тремя составляющими: выбросами токсичных веществ; выбросами парниковых газов; потреблением атмосферного кислорода.

Исходя из перечня представленных составляющих, применительно к городскому наземному транспортному комплексу, целесообразно определить, как относительную величину, приходящуюся на одного перевезённого пассажира:

$$\mathcal{E}K_{\Sigma T} = \frac{\sum \mathcal{U}\mathcal{E}_{TB} + \sum \mathcal{U}\mathcal{E}_{ПАР} + \sum \mathcal{U}\mathcal{E}_{ПР}}{ОП_T}, \quad (1)$$

где

- $\sum \mathcal{U}\mathcal{E}_{TB}$ – суммарный ущерб от выброса токсичных веществ, руб.;
- $\sum \mathcal{U}\mathcal{E}_{ПАР}$ – суммарный ущерб от выброса парниковых газов, руб.;
- $\sum \mathcal{U}\mathcal{E}_{ПР}$ – суммарный ущерб от использования природного ресурса, руб.

Расчёт величины экологического ущерба определяется по методике, утверждённой Государственным

комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды от 09.03.1999 г.:

$$\sum \mathcal{U}\mathcal{E}_{TB} = \mathcal{V}_{ВД} \cdot \left(\sum_{i=1}^N (m_i \cdot k_i) \right) \cdot k_{\mathcal{E}}, \quad (2)$$

где

- $\mathcal{V}_{ВД}$ – показатель удельного ущерба атмосферному воздуху, для экономического района РФ, руб./усл. т;
- m_i – фактическая масса производимого i -го вида загрязняющего вещества, т;
- k_i – коэффициент относительной экологической опасности i -го загрязняющего вещества;
- $k_{\mathcal{E}}$ – коэффициент экологической ситуации для данного региона.

Ущерб от выброса парниковых газов (углекислый газ) определяется по формуле:

$$\sum \mathcal{U}\mathcal{E}_{ПАР} = (1 - S_{РЕГ}) \cdot \mathcal{V}_{CO_2} \cdot Q_{CO_2}, \quad (3)$$

где

- \mathcal{V}_{CO_2} – удельный экологический ущерб от поступления в атмосферный воздух одной тонны углекислого газа, руб./т;
- Q_{CO_2} – фактическая масса поступившего в атмосферный воздух углекислого газа, т;
- $S_{РЕГ}$ – единый коэффициент удельного сокращения выбросов парниковых газов, определяемый с учетом достижения углеродной нейтральности субъекта Российской Федерации.

Оценка экологического ущерба, связанного с потреблением природных ресурсов (кислорода), производится в соответствии с методикой, предложенной

Д. И. Щербаковым [9]. Для расчёта численного значения данной составляющей использована формула:

$$\sum \mathcal{U}\mathcal{E}_{ПР} = 3,45 \cdot Z_K \cdot Q_T \cdot K_H, \quad (4)$$

где

- Z_K – восстановительная стоимость свободного кислорода, руб./т;
- K_H – коэффициент индексации цен;
- Q_T – вес израсходованного топлива, т.

Исходя из условий преобразования энергии невозобновляемых природных ресурсов, все технологии топливно-энергетического обеспечения транспортного комплекса можно разделить на два вида: со стационарными и с мобильными энергетическими установками. К первому виду отнесены технологии, используемые в электротранспортных системах, где преобразование энергии производится на электростанции. Второй вид – использование транспортных средств, оснащённых тепловыми двигателями.

Для транспортных средств, реализующих технологическую схему второго вида, оценка общего экологического ущерба производится исходя из величины

$$КПД_{СТ} = \Pi(КПД_{ТРАНС}) \cdot \Pi(КПД_{ПЕР}) \cdot \Pi(КПД_{АК}), \quad (5)$$

где

$\Pi(КПД_{ТРАНС})$ – общий коэффициент полезного действия устройств преобразования энергии, ед.;

$\Pi(КПД_{ПЕР})$ – общий коэффициент полезного действия передающих устройств, ед.;

$\Pi(КПД_{АК})$ – общий коэффициент полезного действия процессов аккумуляции и расходования энергии на борту транспортного средства, ед.

Для решения поставленной задачи, связанной со сравнительной оценкой показателей энергопотребления транспортных систем, реализующих технологии первого и второго вида, произведён расчёт энергозатрат, необходимых для обеспечения движения пассажирских транспортных средств, дискретно движущихся на перегонах между остановочными пунктами, в условиях действия совокупности силовых факторов.

пробеговых выбросов, нормируемых экологическими стандартами, разработанными для транспортных средств различных экологических классов.

Для транспортных средств, эксплуатируемых в транспортных системах, реализующих технологическую схему первого вида (стационарные энергетические установки), оценка экологического ущерба производится исходя из способа преобразования энергии и энергетических потерь при её передаче от стационарного источника к мобильному транспортному средству. Оценка энергоэффективности технологий данного вида производится исходя из величины суммарного КПД, определяемого по формуле:

Движение транспортного средства, обслуживающего маршрут городского наземного пассажирского транспортного комплекса, представлено как чередование режимов равноускоренного, равномерного и равнозамедленного движения на перегоне между остановочными пунктами.

Тяговая сила, действующая на ведущие колёса транспортного средства, определяется из уравнения силового баланса:

$$\overline{F_K} + \overline{F_j} + \overline{F_T} + \overline{F_B} = 0, \quad (6)$$

где

$\overline{F_K}$ – тяговая сила на ведущих колёсах автотранспортного средства, Н;

$\overline{F_j}$ – сила инерции, Н;

$\overline{F_T}$ – сила трения качения, Н;

$\overline{F_B}$ – сила сопротивления воздуха, Н.

Исходя из результатов преобразования выражения 6, определено выражение для расчёта удельных затрат энергии, необходимой для перемещения пасса-

жирского транспортного средства на расстояние один километр:

$$A_{1км} = \frac{F_{KI} \cdot S_p + F_{KI} \cdot S_{a=0} - 0,3 \cdot F_{KIII} \cdot S_T}{S_{OCT}}, \quad (7)$$

где

F_{KI} – тяговая сила на ведущих колёсах в режиме разгона, Н;

S_p – расстояние, преодолеваемое транспортным средством в режиме разгона, м;

$F_{кш}$ – тяговая сила на ведущих колёсах в режиме равномерного движения, Н;
 $S_{a=0}$ – расстояние, преодолеваемое в режиме равномерного движения, м;
 $F_{кшТ}$ – тяговая сила на ведущих колёсах в режиме торможения, Н;
 S_T – расстояние, преодолеваемое в режиме торможения, м;
 $S_{ост}$ – среднее расстояние между остановочными пунктами, км.

Поставки энергии для транспортных средств, реализующих технологию топливно-энергетического обеспечения первого вида, как правило, осуществляются в рамках единой энергетической системы Российской Федерации, включающей в свой состав стационарные энергетические установки различного типа. В качестве источника отрицательного воздействия на окружающую среду рассматриваются лишь энергетические установки, преобразующие тепло-

вую энергию, образующуюся при окислении углеводородных топлив. Исходя из этого, при оценке экологического ущерба необходимо учесть долю энергии, генерируемую энергетическими установками данного типа. Исходя из этого, для энергообеспечения городского пассажирского транспортного комплекса тепловыми электростанциями генерируется энергия, объём которой может быть рассчитан по формуле:

$$E_{ТЕПЛ} = \frac{A_{км} \cdot L_{ГОД} \cdot П_{ТЕПЛ}}{КПД_{СТ}}, \quad (8)$$

где

$П_{ТЕПЛ}$ – доля энергии, генерируемая тепловыми электростанциями, ед.;
 $КПД_{СТ}$ – суммарный коэффициент полезного действия процессов трансформации и передачи энергии к транспортному средству.

Представленная последовательность расчётных формул является основой для выполнения сравнительного анализа экологической безопасности и энергоэффективности транспортных средств различных классов в условиях городского наземного пассажирского транспортного комплекса.

Результаты сравнительной оценки экологической безопасности и энергетической

эффективности различных категорий транспортных средств

Для практического выполнения расчётов в соответствии с разработанной методикой, проведён анализ информации о параметрах энергоэффективности различных технологий топливно-энергетического обеспечения транспортного процесса. На основе результатов выполненного анализа получены данные, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ энергоэффективности технологий топливно-энергетического обеспечения транспортного процесса

Звенья энергетической цепи	Стационарная энергетическая установка		Мобильная энергетическая установка
	непрерывная передача энергии	дискретная передача энергии	
Преобразование тепловой энергии энергетической установкой	38,4		32,5
Понижающая трансформация	95		–
Передача энергии по линии электропередачи	98		–
Понижающая трансформация	95		–
Передача по кабельной линии	99		–
Преобразование энергии тяговой подстанцией	95	–	–
Передача энергии по контактному проводу	85	–	–
Преобразование энергии зарядной станцией	–	97	–
Заряд и разряд аккумуляторной батареи	–	95	–
Преобразование энергии электродвигателем	87	87	–
Передача механической энергии трансмиссией	97	97	85

Продолжение таблицы 1

Звенья энергетической цепи	Стационарная энергетическая установка		Мобильная энергетическая установка
	непрерывная передача энергии	дискретная передача энергии	
Передача энергии двигателем транспортного средства	98,5	98,5	98,5
Общий КПД передачи	59,2	67,4	83,7
Общий КПД (ΣКПД)	22,9	25,7	27,2

Источник: заимствовано из [8]

Исходя из уравнений силового баланса, составленных в отношении электротранспортных средств, эксплуатируемых в условиях городского наземного пассажирского транспортного комплекса, определены показатели энергопотребления, представленные в таблице 2.

Таблица 2. Показатели энергопотребления электротранспортных средств различных классов и пассажироместимости

Категория транспортного средства	Пассажироместимость, чел.	Энергопотребление, кВт×ч/км	Энергия, генерируемая тепловыми электростанциями, кВт×ч/км
Электробус	22	0,593	0,36
	100	1,563	0,949
	150	2,224	1,351
Троллейбус	100	1,781	1,082
	150	2,532	1,538
Трамвай	150	1,282	0,779
	175	1,605	0,975
	200	1,927	1,17
	250	2,508	1,523

Источник: разработано авторами

На основе данных о значениях удельных выбросов тепловых электростанций определены условные пробеговые выбросы различных категорий электротранспортных средств. Полученные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. Удельные выбросы тепловой электростанции при выработке электроэнергии для совершения одного километра пробега различными категориями электротранспортных средств

Вид выбросов / объём израсходованного топлива	Удельный выброс на 1 кВт×ч, г	Удельный выброс на 1 км пробега, г									
		электробус			троллейбус		трамвай				
		22 чел.	100 чел.	150 чел.	100 чел.	150 чел.	150 чел.	175 чел.	200 чел.	250 чел.	
Объём топлива (метан)	0,221 м ³	0,131 м ³ /км	0,3454 м ³ /км	0,4915 м ³ /км	0,393 м ³ /км	0,5596 м ³ /км	0,283 м ³ /км	0,3516 м ³ /км	0,4259 м ³ /км	0,5543 м ³ /км	
Сернистые газы (SO _x)	0,0014	0,0008	0,0022	0,0031	0,0025	0,0035	0,0018	0,0022	0,0027	0,0035	
Оксиды азота (NO _x)	1,4	0,830	2,1882	3,1136	2,4934	3,5448	1,7948	2,2278	2,6978	3,5112	
Твердые частицы (сажа)	0,0524	0,031	0,0819	0,1165	0,0933	0,1327	0,0672	0,0834	0,1010	0,1314	
Диоксид углерода (CO ₂)	443	262,7	692,4	985,2	789,0	1121,7	567,9	704,9	853,7	1111,0	

Источник: разработано авторами

Для расчёта абсолютной величины годовых выбросов веществ, определяющих экологический ущерб, формируемый в результате эксплуатации транспортных средств городского пассажирского транспортного комплекса, кроме величины пробеговых выбросов, необходимо определить численность транспортных средств, обслуживающих городские маршруты и среднюю величину годового пробега единичного транспортного средства.

Необходимая численность транспортных средств определяется исходя из выполнения двух условий [12; 17]:

- I – обеспечение заданного интервала движения;
- II – формирование провозной способности парка, обеспечивающей возможность вывоза всех пассажиров в периоды пиковых нагрузок.

Обеспечение первого условия определяется неравенством:

$$N_{ABT}^{\min I} \geq \frac{L_{МАРШ}}{I^{\max} \cdot V_{МАРШ}^{CP}}, \quad (9)$$

где

$N_{ABT}^{\min I}$ – минимально-необходимая численности транспортных средств, определяемая исходя из обеспечения интервала движения, ед.;

$L_{МАРШ}$ – общая протяжённость маршрута (оборотного рейса), км.;

$V_{МАРШ}^{CP}$ – средняя скорость движения транспортных средств на маршруте, км/ч;

I^{\max} – максимально-допустимый интервал движения транспортных средств на маршруте, час.

Численность транспортных средств, обеспечивающая выполнение второго условия, определяется неравенством:

$$N_{ABT}^{\min II} \geq \frac{Q_{МАРШ}^{MAX} \cdot L_{МАРШ}}{P \cdot V_{МАРШ}^{CP}}, \quad (10)$$

где

$Q_{МАРШ}^{MAX}$ – максимальный часовой объём перевозок на наиболее нагруженном участке маршрута, пасс/час;

P – пассажироместность транспортных средств, обслуживающих маршрут, пасс.

В качестве итогового значения принимается большее из величин, полученных при помощи формул (9) и (10).

Исходя из обозначенных условий, произведено моделирование оптимальных структурных параметров парка типовых маршрутов городского пассажирского транспортного комплекса. Моделирование выполнено для периодов смены, охватывающих, как пиковые, так и межпиковые временные интервалы.

На основе данных, полученных в результате моделирования, определены значения экологического ущерба, производимого различными категориями транспортных средств и определяемые, как функция от годового объёма перевозок. Фрагмент полученных данных представлен на рисунке 1.

Таким образом, получены данные, позволяющие произвести формирование структурных параметров парка транспортных средств, обслуживающих маршруты городского наземного пассажирского транспортного комплекса, с учётом установленной величины экологического ущерба.

Заключение

Исходными данными для выполнения научной работы послужила информация о составляющих, формирующих величину экологического ущерба,

производимого транспортными средствами, эксплуатируемыми на маршрутах городского наземного пассажирского транспортного комплекса. При расчёте энергопотребления различных категорий транспортных средств учтены показатели энергоэффективности, определяемые величиной суммарного КПД. При помощи разработанной методики произведён расчёт показателей энергопотребления различными категориями транспортных средств. На основе полученных данных, с учётом результатов моделирования структурных параметров парка, определены зависимости экологического ущерба при эксплуатации транспортных средств городского наземного пассажирского транспортного комплекса от годового объёма перевозок, что является одним из компонентов научной новизны данного исследования.

Полученные данные позволяют сформировать структурный состав парка транспортных средств городского наземного пассажирского транспортного комплекса с учётом экологического ущерба, производимого различными категориями транспортных средств. Оптимизация структурных параметров парка транспортных средств, обслуживающих маршруты городского пассажирского транспортного комплекса, является одним из этапов согласованного формирования структурных параметров подсистем, входящих

в его состав. Разработка методологии согласованного формирования структурных составляющих транс-

портного комплекса является одним из направлений продолжения проводимого исследования.

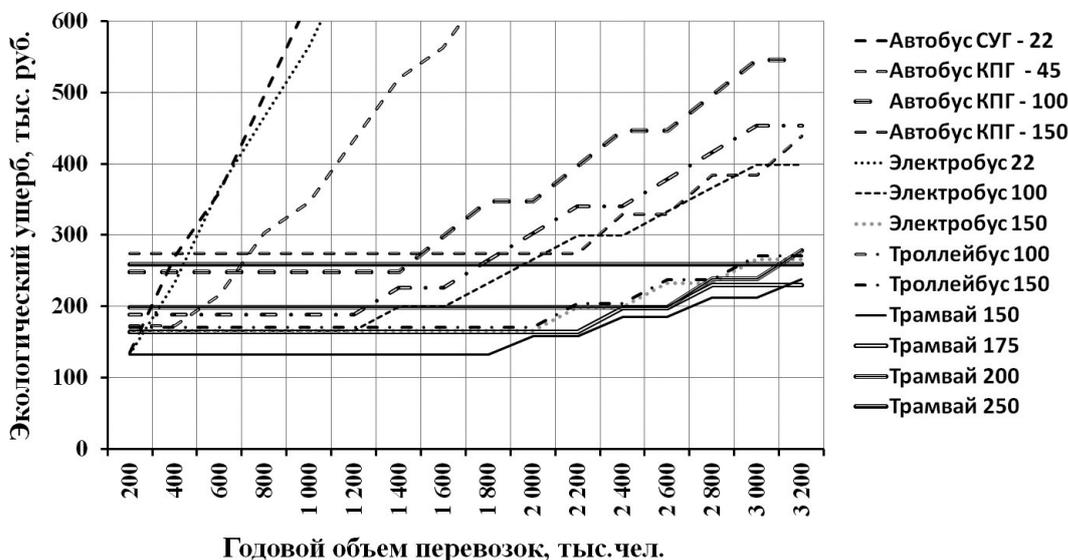


Рисунок 1. Зависимости экологического ущерба при эксплуатации транспортных средств городского наземного пассажирского транспортного комплекса от годового объема перевозок

Источник: разработано авторами

Литература

1. Абржина Л. Л., Магарил Е. Р. Методический подход к экономической оценке ущерба атмосферному воздуху // Вестник УГТУ-УПИ. Серия: Экономика и управление. – 2008. – № 2. – С. 100–103.
2. Азаров В. К., Васильев А. В., Кутенёв В. Ф. Современные экологические проблемы эксплуатации автотранспортных средств // Двигатель. – 2022. – № 1–3 (139–141). – С. 50–53. – EDN: CXZGJM.
3. Азаров В. К., Зозулин Е. М., Кутенёв В. Ф. Экологический ущерб от двигателей автомобилей в зависимости от вида потребляемого топлива // Транспорт на альтернативном топливе. – 2022. – № 6 (90). – С. 48–55. – EDN: VIPOMF.
4. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке / Д. В. Капский [и др.] // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 150–157. – <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157>. – EDN: JHSSJB.
5. Газобаллонные автомобили / Е. Г. Григорьев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 216 с.
6. Дрючин Д. А., Горбачев С. В. Техно-экономический анализ применения сжиженного природного газа на автомобильном транспорте // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2022. – № 4. – С. 116–127. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-116>. – EDN: TSEQVQ.
7. Ложкин В. Н., Буренин Н. С., Медейко В. В. Современные экологические требования к автотранспорту в условиях производства и эксплуатации // Транспорт российской федерации. – 2005. – № 1 (1). – С. 64–65. – EDN: JXZZRZ.
8. Ложкина О. В. Мониторинг и прогнозирование опасного техногенного загрязнения атмосферы парниковыми газами транспорта: монография. – Санкт-Петербург. Университет ГПС МЧС России им. Героя Российской Федерации генерала армии Е. Н. Зиничева, 2023. – 164 с. – EDN: NZAFLN.
9. Лютко В., Луканин В. Н., Хачиян А. С. Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания / ред.: В. Лютко, В. Н. Луканин. – М.: МАДИ, 2000. – 311 с.
10. Медведева О. Е., Артеменков А. И. Оценка ущерба от загрязнения атмосферного воздуха в России. Современные подходы и методика // Экономика и управление народным хозяйством. – 2019. – № 8 (215). – С. 31–42. – <https://doi.org/10.24411/2072-4098-2019-10802>.

11. Методические основы организации экологических зон с низкими выбросами автомобильного транспорта: монография / В. В. Донченко [и др.]. – Санкт-Петербург: ИПК «Коста», 2023. – 264 с. – EDN: JATLIJ.
12. Методы расчёта выбросов от автотранспорта и результаты их применения / В. Донченко [и др.] // Журнал автомобильных инженеров. – 2014. – № 3 (86). – С. 44–51. – EDN: SNGMIR.
13. Моделирование оптимального интервала движения пассажирских автотранспортных средств / Н. Н. Якунин [и др.] // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2018. – № 2. – С. 88–100. – <https://doi.org/10.15593/24111678/2018.02.10>.
14. О тенденциях в автомобилестроении в области снижения негативных воздействий на окружающую среду / А. А. Ипатов [и др.] // Труды НАМИ. – 2010. – № 244. – С. 52–72. – EDN: NGAYCT.
15. Певнев Н. Г., Банкет М. В., Бакунов А. С. Перспективы развития инфраструктуры использования КПП в Омске // Транспорт на альтернативном топливе. – 2014. – № 5 (41). – С. 7–11.
16. Повышение эффективности функционирования автотранспортного комплекса региона на основе применения альтернативных схем топливно-энергетического обеспечения / А. С. Тищенко [и др.] // Газовая промышленность. – 2020. – № 1 (795). – С. 74–80. – EDN: YKLPYS.
17. Рузский А. В., Кунин Ю. И., Парфенов Е. В. Обеспечение экологической безопасности автотранспортных средств в период эксплуатации: вопросы нормирования и контроля // Журнал автомобильных инженеров. – 2012. – № 3 (74). – С. 19–25. – EDN: PЕHONV.
18. Системная оценка воздействия улично-дорожной сети на атмосферу урбанизированной территории / Е. В. Бондаренко [и др.] // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 2 (84). – С. 184–197. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-184-197>. – EDN: JGFTGV.
19. Трофименко Ю. В., Комков В. И. Актуализированный прогноз численности, структуры автомобильного парка России по типу энергоустановок и выбросов парниковых газов до 2050 года // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2023. – Т. 20, № 3 (91). – С. 350–361. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>. – EDN: DDEUBI.
20. Филиппов А. А., Сулейманов И. Ф., Арсланов М. А. Теоретические основы комплексного подхода к оценке экологической опасности автотранспорта на участке урбанизированной территории // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2019. – № 1. – С. 97–103. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2019-1-97>. – EDN: YZKKWD.
21. Формирование газозаправочной инфраструктуры, адаптированной к параметрам работы пассажирского маршрутного транспорта / Е. В. Бондаренко [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 1–4 (55). – С. 25–29. – <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.55.163>. – EDN: XRHGSX.
22. Штанг А. А., Михалева О. А. Проектирование гибридного транспортного средства на основе современных накопителей энергии // Молодой ученый. – 2012. – № 11 (46). – С. 107–109. – EDN: PFXCRR.
23. Щербаков В. Н. Экологическая безопасность автотранспорта // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2006. – № 1 (13). – С. 167–171. – EDN: HNFYLM.
24. Якимов М. Р. Подходы к формированию эффективной маршрутной сети крупных городов // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 3 (55). – С. 107–113. – <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-107-113>. – EDN: ESGEPA.
25. Aslam A., et al. (2020) Pollution characteristics of particulate matter (PM_{2,5} and PM₁₀) and constituent carbonaceous aerosols in a south asian future megacity. *Applied Sciences (Switzerland)*. Vol. 10, No. 24, pp. 1–17. (In Eng.).
26. Lozhkin V., et al. (2020) On information technology development for monitoring of air pollution by road and water transport in large port cities. *Communications in computer and information science*. Vol. 1201, pp. 384–396. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-46895-8_30. – EDN: BONOPH (In Eng.).
27. Tripathi P., et al. (2018) Variation in doses and duration of particulate matter exposure in bronchial epithelial cells results in upregulation of different genes associated with airway disorders. *Toxicol In Vitro*. Vol. 51, pp. 95–105. – <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2018.05.004> (In Eng.).
28. Wu S., et al. (2013) Blood pressure changes and chemical constituents of particulate air pollution: results from the Healthy Volunteer Natural Relocation (HVNR) Study. *Environmental Health Perspectives*. Vol. 121, No 1, pp. 66–72. – <https://doi.org/10.1289 / ehp.1104812>. (In Eng.).

References

1. Abrzhina, L. L., Magaril, E. R. (2008) [Methodological approach to the economic assessment of damage to atmospheric air]. *Vestnik UGTU-UPI. Seriya: Ekonomika i upravleniye* [Bulletin of UGTU-UPI. Series: Economics and Management]. Vol. 2, pp. 100–103. (In Russ.).

2. Azarov, V. K., Vasilev, A. V., Kutenyov, V. F. (2022) [Modern environmental problems of motor vehicle operation]. *Dvigatel* [Engine]. Vol. 1–3 (139–141), pp. 50–53. – EDN: CXZGJM. (In Russ.).
3. Azarov, V. K., Zozulin, E. M., Kutenyov, V. F. (2022) [Environmental damage from car engines, depending on the type of fuel consumed]. *Transport na al'ternativnom toplive* [Alternative fuel transport]. Vol. 6 (90), pp. 48–55. – EDN: BIPOMF. (In Russ.).
4. Kapsky, D. V. (2022) [Analysis of the development of various types of urban electric transport in Polotsk and Novopolotsk]. *Nauka i tekhnika* [Science and technology] Vol. 21, No. 2, pp. 150–157. – <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157>. – EDN: JHSSJB. (In Russ.).
5. Grigoriev, E. G., et al. (1986) [Gas cylinder cars]. *Mashinostroyeniye* [Mechanical engineering.]. Moscow. 216 p. (In Russ.).
6. Dryuchin, D. A., Gorbachev, S. V. (2022). [Technical and economic analysis of the use of liquefied natural gas in road transport]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 4, pp. 116–127. – <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-4-116>. – EDN: TSEQVQ. (In Russ.).
7. Lozhkin, V. N., Burenin, N. S., Medejko, V. V. (2005) [Modern environmental requirements for vehicles in production and operation conditions]. *Transport rossiyской federatsii* [Transport of the Russian Federation]. Vol. 1 (1), pp. 64–65. – EDN: JXZZRZ. (In Russ.).
8. Lozhkina, O. V. (2023) [Monitoring and forecasting of dangerous technogenic pollution of the atmosphere by greenhouse gases of transport]. Monitoring i prognozirovanie opasnogo tekhnogennogo zagryazneniya atmosfery parnikovymi gazami transporta [The University of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia named after Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev]. Saint-Petersburg. – 164 p. – EDN: NZAFLN.
9. Lyotko, V., Lukanin, V. N., Khachiyani, A. S. (2000) *Primeneniye al'ternativnykh topliv v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya* [Application of alternative fuels in internal combustion engines]. M.: MADI, 311 p.
10. Medvedeva, O. E., Artemenkov, A. I. (2019) [Assessment of damage from atmospheric air pollution in Russia. Modern approaches and methods]. *Ekonomika i upravleniye narodnym khozyaystvom* [Economics and management of the national economy]. Vol. 8 (215), pp. 31–42. – <https://doi.org/10.24411/2072-4098-2019-10802>. (In Russ.).
11. Donchenko, V. V., et al. (2023) *Metodicheskie osnovy organizatsii ekologicheskikh zon s nizkimi vybrosami avtomobil'nogo transporta* [Methodological foundations of the organization of ecological zones with low emissions of motor transport]. [IPK «Costa»]. Saint-Petersburg, 264 p. – EDN: JATLIJ.
12. Donchenko, V. V. (2014) [Methods for calculating emissions from motor vehicles and the results of their application]. *Metody raschota vybrosov ot avtotransporta i rezul'taty ikh primeneniya* [Journal of Automotive Engineers]. Vol. 3 (86), pp. 44–51. – EDN: SNGMIR. (In Russ.).
13. Yakunin, N. N., et al. (2018) [Modeling of the optimal interval of movement of passenger vehicles]. *Transport. Transportnyye sooruzheniya. Ekologiya* [Transport. Transport facilities. Ecology.]. Vol. 2, pp. 88–100. – <https://doi.org/10.15593/24111678/2018.02.10>. (In Russ.).
14. Ipatov, A. A. (2010) [On trends in the automotive industry in the field of reducing negative impacts on the environment]. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI]. Vol. 244, pp. 52–72. – EDN: NGAYCT. (In Russ.).
15. Pevnev, N. G., Banquet, M. V., Bakunov, A. S. (2014) [Prospects for the development of CNG use infrastructure in Omsk]. *Transport na al'ternativnom toplive* [Alternative fuel transport] No. 5 (41), pp. 7–11. (In Russ.).
16. Tishchenko, A. S., et al. (2020) [Improving the efficiency of the functioning of the motor transport complex of the region based on the use of alternative fuel and energy supply schemes]. *Transport na al'ternativnom toplive* [Gas industry]. Vol. 1 (795), pp. 74–80. – EDN: YKLPYS. (In Russ.).
17. Ruzskij, A. V., Kunin, Yu. I., Parfenov, E. V. (2012) [Ensuring the environmental safety of motor vehicles during operation: issues of rationing and control]. *Zhurnal avtomobil'nykh inzhenerov* [Journal of Automotive Engineers]. No. 13 (74), pp. 19–25. – EDN: PEHONV. (In Russ.).
18. Bondarenko, E. V., et al. (2022) [Systematic assessment of the impact of the road network on the atmosphere of an urbanized area]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University]. Vol. 19, No. 2 (84), pp. 184–197. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-184-197>. – EDN: JGFTGV. (In Russ.).
19. Trofimenko, Yu. V., Komkov, V. I. (2023) [Aktualizirovannyj prognoz chislenosti, struktury avtomobil'nogo parka Rossii po tipu energoustanovok i vybrosov parnikovyh gazov do 2050 goda]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University]. Vol. 20, No. 3 (91), pp. 350–361. – <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2023-20-3-350-361>. – EDN: DDEUBI. (In Russ.).
20. Filippov, A. A., Suleymanov, I. F., Arslanov, M. A. (2019) [Theoretical foundations of an integrated approach

to the assessment of the environmental hazard of vehicles on the site of an urbanized territory]. *Intellekt. Innovacii. Investicii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 97–103. – [https://doi.org/ 10.25198/2077-7175-2019-1-97](https://doi.org/10.25198/2077-7175-2019-1-97). – EDN: YZKKWD. (In Russ.).

21. Bondarenko, E. V., et al (2017) [Formation of gas refueling infrastructure adapted to the parameters of passenger route transport]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [Bulletin of the Siberian State Automobile and Road University]. Vol. 1–4 (55), pp. 25–29. – [https://doi.org/ 10.23670/IRJ.2017.55.163](https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.55.163). – EDN: XRHGSX. (In Russ.).

22. Shtang, A. A., Mikhaleva, O. A. (2012) [Designing a hybrid vehicle based on modern energy storage devices]. *Molodoy uchenyy* [Young scientist]. Vol. 11 (46), pp. 107–109. – EDN: PFXCRR. (In Russ.).

23. Shcherbakov, V. N. (2006) [Environmental safety of vehicles]. *Vestnik RUDN. Ser. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Bulletin of the RUDN. Ser. Ecology and life safety]. Vol. 1 (13), pp. 167–171. – EDN: HNFYLM. (In Russ.).

24. Yakimov, M. R. (2006) [Approaches to the formation of an effective route network of large cities]. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya* [Bulletin of the Ural State University of Railway Engineering]. Vol. 3, pp. 107–113. – <https://doi.org/10.20291/2079-0392-2022-3-107-113>. – EDN: ESGEPA. (In Russ.).

25. Aslam, A. et al. (2020) Pollution characteristics of particulate matter (PM_{2,5} and PM₁₀) and constituent carbonaceous aerosols in a south asian future megacity. *Applied Sciences (Switzerland)*. Vol. 10, No. 24, pp. 1–17. (In Eng.).

26. Lozhkin, V., et al. (2020) On information technology development for monitoring of air pollution by road and water transport in large port cities. *Communications in computer and information science*. Vol. 1201, pp. 384–396. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-46895-8_30. – EDN: BONOPH. (In Eng.).

27. Tripathi, P. et al. (2018) Variation in doses and duration of particulate matter exposure in bronchial epithelial cells results in upregulation of different genes associated with airway disorders. *Toxicol In Vitro*. Vol. 51, pp. 95–105. – <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2018.05.004>. (In Russ.).

28. Wu, S. et al. (2013) Blood pressure changes and chemical constituents of particulate air pollution: results from the Healthy Volunteer Natural Relocation (HVNR) Study. *Environmental Health Perspectives*. Vol. 121. No 1, pp. 66–72. – <https://doi.org/10.1289/ehp.1104812>. (In Eng.).

Информация об авторах:

Дмитрий Алексеевич Дрючин, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической эксплуатации и ремонта автомобилей, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

ORCID ID: 0000-0002-1311-6462

e-mail: dmi-dryuchin@yandex.ru

Николай Николаевич Якунин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта; член-эксперт общественного совета при Минтрансе России, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

e-mail: yakunin-n@yandex.ru

Наталья Владимировна Якунина, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры автомобильного транспорта, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

ORCID ID: 0000-0002-8952-2694

e-mail: nat.yakunina56@yandex.ru

Вклад соавторов:

Дрючин Д. А. – анализ проблемы, формулирование цели и задач исследования, названия статьи, разработка концептуального подхода, и теоретической части исследования, интерпретация результатов моделирования, формулировка выводов.

Якунин Н. Н. – координация работ при проведении анализа литературных источников, обоснование концепции исследования, планирование аналитической части исследования, обобщение результатов исследования, формулировка выводов, интерпретация результатов моделирования, редактирование и переработка рукописи.

Якунина Н. В. – анализ результатов литературного обзора, планирование экспериментально-аналитической части исследования, сбор и систематизация исходных данных, моделирование и обработка полученных

результатов.

Статья поступила в редакцию: 10.10.2023; принята в печать: 29.03.2024.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Information about the authors:

Dmitry Alekseevich Dryuchin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Technical Operation and Automotive Repair, Orenburg State University, Orenburg, Russia

ORCID ID: 0000-0002-1311-6462

e-mail: dmi-dryuchin@yandex.ru

Nikolai Nikolaevich Yakunin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automotive Transport; expert member of the public council under the Ministry of Transport of Russia, Orenburg State University, Orenburg, Russia

e-mail: yakunin-n@yandex.ru

Natalya Vladimirovna Yakunina, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automotive Transport, Orenburg State University, Orenburg, Russia

ORCID ID: 0000-0002-8952-2694

e-mail: nat.yakunina56@yandex.ru

Contribution of the authors:

Dryuchin D. A. – analysis of the problem, formulation of the purpose and objectives of the study, the title of the article, development of a conceptual approach, and the theoretical part of the study, interpretation of modeling results; formulation of conclusions.

Yakunin N. N. – coordination of work during the analysis of literary sources, substantiation of the research concept; planning of the analytical part of the study; generalization of research results, formulation of conclusions, interpretation of modeling results, editing and processing of the manuscript.

Yakunina N. V. – analysis of the results of a literary review, planning of the experimental and analytical part of the study, collection and systematization of initial data, modeling and processing of the results obtained.

The paper was submitted: 10.10.2023.

Accepted for publication: 29.03.2024.

The authors have read and approved the final manuscript.