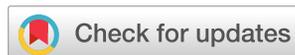


Научная статья  
УДК 629.341  
DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-62-73>  
EDN: ЕТМКНН



## РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УВЕЛИЧЕНИЮ ЗАПАСА ХОДА ЭЛЕКТРОБУСОВ УСТАНОВКОЙ СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ ФАЗОПЕРЕХОДНЫХ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

С.А. Горожанкин<sup>1</sup>, Н.В. Савенков<sup>1</sup>, О.В. Соболев<sup>1</sup> ✉, А.М. Моржухин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,  
г. Макеевка, Россия

<sup>2</sup>Государственный университет Дубна,  
г. Дубна, Россия

✉ [o.v.sobol@donnasa.ru](mailto:o.v.sobol@donnasa.ru)

✉ ответственный автор

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Проблемы массового применения электробусов на городских маршрутах являются низкие эксплуатационные показатели, в том числе ресурс тяговых аккумуляторных батарей (ТАБ), существенная ограниченность автономного хода в сравнении с автотранспортными средствами (АТС) на основе ДВС, высокая стоимость аккумуляторных батарей, ограниченное внедрение зарядной инфраструктуры, ухудшение эффективной работы при низких температурах окружающей среды и т.д. От эффективности восполнения, хранения и расхода электроэнергии на борту электробуса зависит большинство эксплуатационных показателей, к которым можно отнести: запас хода, ресурс ТАБ и экономические затраты на эксплуатацию.

**Материалы и методы.** В работе применяются методы численного моделирования движения электробуса КамАЗ 6282 в условиях ездового цикла SORT 2: MIXED.

**Результаты.** В данной работе проанализирован баланс электрической энергии на борту электробуса КамАЗ 6282 при его эксплуатации на городском маршруте, а также проведен поиск наиболее рациональных способов ее расхода за счет внедрения систем терморегуляции пассажирского салона и рабочего места водителя на основе установки теплоаккумулятора (ТА) с фазопереходными теплоаккумулирующими материалами (ФПТАМ).

**Обсуждение и заключение.** Установка предлагаемой системы на основе ФПТАМ при условии обеспечения запаса хода на уровне серийной модели позволяет уменьшить ёмкость батареи на 24% (до 549 МДж) или при сохранении ёмкости 720 МДж увеличить запас хода на 44% – до 130 км.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** городской маршрут, электробус, баланс электрической энергии, система терморегуляции, фазопереходные теплоаккумулирующие материалы

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**БЛАГОДАРНОСТИ:** благодарность рецензентам статьи.

Статья поступила в редакцию 23.11.2023; одобрена после рецензирования 02.02.2024; принята к публикации 20.02.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Соболев О.В., Моржухин А. М. Разработка мероприятий по увеличению запаса хода электробусов установкой системы терморегуляции на основе фазопереходных теплоаккумулирующих материалов // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 1. С. 62-73. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-62-73>

© Горожанкин С.А., Савенков Н.В., Соболев О.В., Моржухин А.М., 2024



Контент доступен под лицензией  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

Origin article

DOI: <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-62-73>

EDN: ETMKHH

## DEVELOPMENT OF MEASURES TO INCREASE CRUISING RANGE OF ELECTRIC BUSES BY INSTALLING THERMAL CONTROL SYSTEM BASED ON PHASE -TRANSITIONAL HEAT-ACCUMULATING MATERIALS

Sergei A. Gorozhankin<sup>1</sup>, Nikita V. Savenkov<sup>1</sup>, Oksana V. Sobol'<sup>1</sup> ✉, Artyom M. Morzhukhin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Donbas National Academy of Engineering and Architecture, Makeevka, Russia

<sup>2</sup>Dubna State University, Dubna, Russia

✉ o.v.sobol@donnasa.ru

✉ corresponding author

### ABSTRACT

**Introduction.** The problems of the mass use of electric buses on urban routes are low operational indicators, including the life of traction batteries (TAB), a significant limited autonomous travel compared to motor vehicles based on internal combustion engines, high cost of batteries, limited implementation of charging infrastructure, deterioration of efficient operation at low ambient temperatures, etc. Most operating parameters depend on the efficiency of replenishment, storage and consumption of electricity on board the electric bus, which include: power reserve, TAB life and economic costs for operation.

**Materials and methods.** The work uses methods of numerical modelling of the movement of the KAMAZ 6282 electric bus under the conditions of the SORT 2: MIXED test cycle.

**Result.** In this work, the balance of electric energy on board the KAMAZ 6282 electric bus during its operation on the city route was analyzed, and the search for the most rational ways of its consumption was carried out due to the introduction of thermal control systems for the passenger compartment and the driver's workplace based on the installation of a heat accumulator (HA) with phase transfer heat accumulating materials (PFTAM).

**Discussion and conclusion.** The installation of the proposed PFTAM-based system, provided that the range is provided at the level of the serial model, enables to reduce the battery capacity by 24% (up to 549 MJ) or, while maintaining the capacity of 720 MJ, increase the range by 44% up to 130 km.

**KEYWORDS:** urban route, electric bus, electric energy balance, thermoregulation system, phase-transfer heat-accumulating materials

**CONFLICT OF INTERESTS:** The authors declare no conflict of interest.

**ACKNOWLEDGEMENT:** we are grateful to the reviewers of the article.

The article was submitted 23.11.2023; approved after reviewing 02.02.2024; accepted for publication 20.02.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

**Financial transparency:** the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

*For citation.* Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Sobol O.V., Morzhukhin A.M. Development of measures to increase the cruising range of electric buses by installing thermal control system based on phase transitional heat accumulating materials. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (1): 62-73. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-1-62-73>

© Gorozhankin S.A., Savenkov N.V., Sobol O.V., Morzhukhin A.M., 2024



Content is available under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 License.

## ВВЕДЕНИЕ

Транспортный сектор является одним из крупнейших потребителей ископаемого топлива. По этой причине декарбонизация этого сектора может иметь большое значение для борьбы с глобальным потеплением, загрязнением воздуха и деградацией экосистем. Наиболее надежным и перспективным решением этой проблемы представляется электрификация транспортных средств. Общественный автобусный транспорт – первостепенный кандидат на электрификацию, т.к. только на автобусы приходится более 80% всех пассажирских поездок; данный вид транспорта имеет фиксированные маршруты и возможность медленной зарядки в течение ночи [1, 2].

Энергопотребление электромобиля имеет большое экономическое и экологическое значение как ключевой параметр при определении стоимости топлива и экологичности. Его оценка является жизненно важным требованием для планирования, развертывания и создания необходимой зарядной инфраструктуры. В реальных условиях энергопотребление электробуса зависит от многих факторов, таких как тип автобуса, профиль скорости (скорость транспортного средства в зависимости от времени, в т.ч. с учетом загруженности дорог), количество перевозимых пассажиров, процессов их посадки и высадки, потребности во вспомогательной энергии [3]. При этом прогнозируемые условия движения рационально планировать на основе статистических данных о режимах (которыми являются стандартизированные ездовые циклы), а также методах онлайн-оценки [2-5], в т.ч. основанных на моделях глубокого обучения [4, 6].

Для решения проблемы автономности электробусов приложено немало усилий. В последнее время исследования в основном сосредоточены на рациональном управлении энергопотреблением. И лишь немногие из них направлены на снижение энергопотребления электробусов усовершенствованием интегрированных систем терморегулирования [2]. Эти системы предназначены для поддержания комфортной температуры пассажирского салона и рабочего места водителя, необходимой температуры тяговой аккумуляторной бата-

реи (ТАБ), а также с целью отвода избыточного тепла от тягового электродвигателя(ей) (ТЭД). Работа данных систем является ключевым фактором, обуславливающим энергопотребление электромобиля [6], особенно для городских автобусов, которые отличаются большим количеством пассажиров и большим объемом и площадью салона [2]. Так, в соответствии с [2, 7], потребление энергии для работы данных систем может составлять в диапазоне 30–70% от общего энергопотребления электробуса на маршруте<sup>1</sup>. Соответствующая схема энергетических затрат электробуса приведена на рисунке 1 при следующих условиях: тяговый режим движения, процессы рекуперации кинетической энергии и зарядки ТАБ не осуществляются, системы терморегуляции функционируют в режиме обогрева.

Помимо рационального выбора конфигураций гидравлических контуров рассматриваемых систем [2], другими альтернативами повышения энергоэффективности электробуса может быть замена этих систем или их элементов на более эффективные. Например, электрический отопитель (РТС) может быть заменен на систему теплового насоса для обогрева салона электробуса, известно применение автономных отопителей на жидком углеводородном топливе<sup>2</sup> (однако это частично лишает автотранспортное средство ключевых преимуществ электромобиля), а также использование избыточного тепла от ТАБ. Внедряются и комбинированные схемы, включающие признаки перечисленных.

Цель данной работы – исследовать баланс электрической энергии на борту электробуса КамАЗ 6282 при его эксплуатации на городском маршруте, а также произвести поиск наиболее рациональных способов ее расхода за счет внедрения систем терморегуляции пассажирского салона и рабочего места водителя на основе установки теплоаккумуляторов (ТА) с фазопереходными теплоаккумулирующими материалами (ФПТАМ).

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

- выполнить обоснование актуальности выбранной темы исследования;
- выбрать ездовой цикл для определения расхода электрической энергии электробуса;

<sup>1</sup> Певнев Н.Г. Повышение эффективности эксплуатации электромобилей в сложных климатических условиях / Э.Р. Василенко, Н.Г. Певнев // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. 2019. С. 98–101.

<sup>2</sup> Официальный сайт КАМАЗ: [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://КамАЗ.ru/production/buses/pdf/Электробус%20КАМАЗ-6282.pdf> (дата обращения: 12/12/2023)

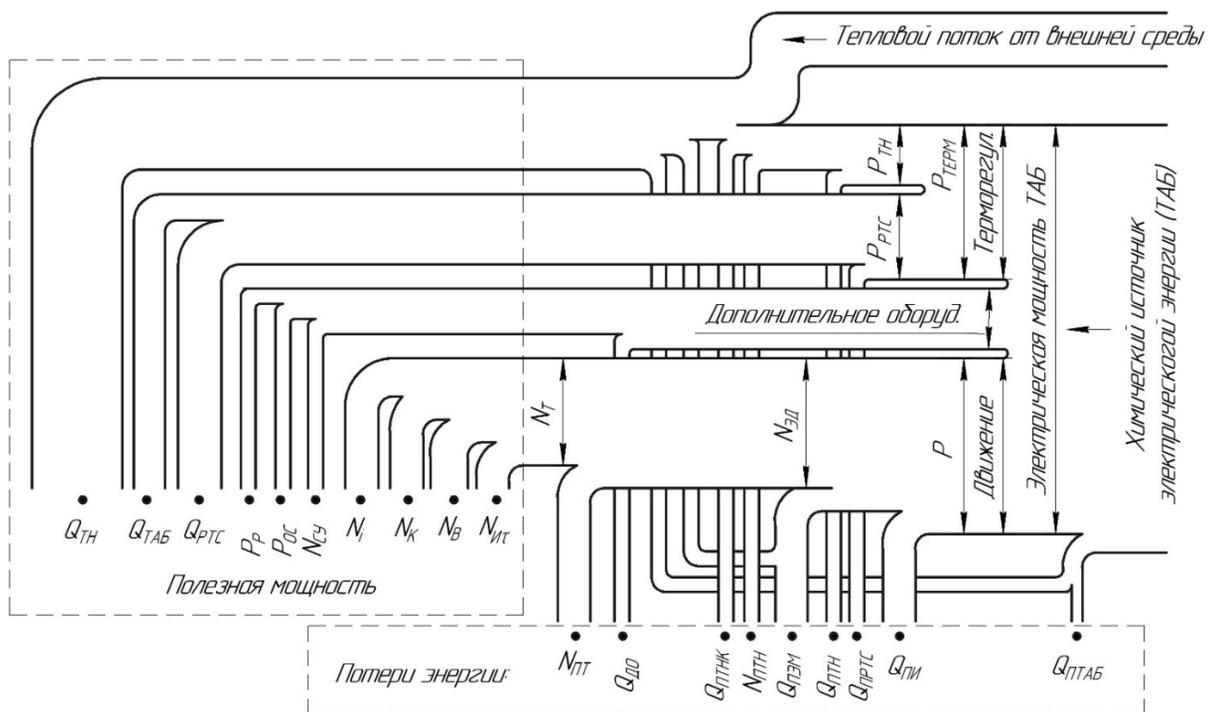


Рисунок 1 – Схема составляющих мощностей в процессе движения электробуса  
Источник: составлено авторами.

Figure 1 – Diagram of power components during electric bus movement  
Source: compiled by the authors.

- разработать математическую модель характеристик АТС и условий его эксплуатации;
- выбрать в качестве примера параметры конкретного электробуса и выполнить расчет баланса электрической энергии в условиях выбранного ездового цикла;
- предложить рациональные способы снижения расхода электрической энергии за счет применения систем терморегуляции на основе ФПТАМ и получить конкретные рекомендации по улучшению эксплуатационных свойств АТС.

В результате анализа научной литературы были установлены основные факторы, влияющие на интенсивность разряда энергии тяговых аккумуляторных батарей электробуса при эксплуатации в условиях города [8-13]:

- режим движения и транспортные условия (скорость движения, интенсивность движения, плотность транспортного потока (разгоны/торможения), количество перевозимых пассажиров, количество остановочных пунктов и время нахождения на них и т.д.);
- природно-климатические условия (температура окружающего воздуха, скорость и направление ветра и т.д.);
- дорожные условия (наличие регулируемых и нерегулируемых перекрестков, пеше-

ходные переходы, качество дорожного полотна, уклон дороги, наличие на дорожном полотне осадков и т.д.);

- технические характеристики электробуса (продолжительность эксплуатации транспортного средства, характеристики бортовых источников энергии, тяговых аккумуляторных батарей, накопителей энергии, схема работы дополнительного оборудования и т.д.);

- психофизиологические особенности водителя и др.

На рисунке 1 показаны составляющие электрической мощности ТАБ, направленные на питание тяговых электродвигателей  $P$ , систем терморегуляции  $P_{\text{ТЕРМ}}$  и дополнительного оборудования.

Рабочий процесс электрической силовой установки электробуса при её работе в тяговом режиме сопровождается следующими потерями мощности: в силовом электрическом преобразователе (инверторе)  $Q_{\text{ПИ}}$ , в электрической машине  $Q_{\text{ПЭМ}}$ , а также в трансмиссии  $N_{\text{ПТ}}$ . Развиваемая полезная мощность на ведущих колесах  $N_T$  расходуется на преодоление мощностей сил сопротивления движению: дороги  $N_K$ , подъему пути  $N_i$ , воздушной среды  $N_B$ , приведенной суммарной инерции поступательных и маховых масс электробуса  $N_{\text{ИТ}}$ .

Расходы электрической энергии на работу дополнительного оборудования при неизбежных суммарных потерях  $Q_{\text{до}}$  обеспечивают питание радиооборудования  $P_{\text{р}}$ , элементов освещения и сигнализации  $P_{\text{ос}}$ , а также привод агрегатов систем управления электробуса  $N_{\text{су}}$ .

Электрическая мощность  $P_{\text{рТС}}$  расходуется на работу электрических нагревателей, которые при суммарных сопутствующих потерях  $Q_{\text{пРТС}}$  обогревают пассажирский салон и рабочее место водителя с тепловой мощностью  $Q_{\text{рТС}}$ , а также обеспечивают подогрев ТАБ –  $Q_{\text{ТАБ}}$ . Затраты электрической мощности на привод теплонасосной установки  $P_{\text{тн}}$  обеспечивают её работу с тепловой мощностью  $Q_{\text{тн}}$  при сопутствующих потерях  $N_{\text{птн}}$  и  $Q_{\text{птнк}}$  – соответственно, компрессорной части и гидравлического контура. На приведенной схеме также отражен процесс использования для обогрева пассажирского салона и рабочего места водителя части избыточной теплоты, выделяемой при работе ТАБ  $Q_{\text{пТАБ}}$  и электрической машины  $Q_{\text{пэм}}$ .

При анализе особенностей эксплуатации электробусов был выявлен ряд работ, в которых исследуются их конструктивные особенности, режимы движения, функционирование и зарядка тяговых аккумуляторных батарей, а также зарядная инфраструктура. На изучение процессов расхода электрической энергии движения электробусов направлены работы [3, 14, 15], работу систем терморегуляции пассажирского салона и рабочего места водителя работы [3, 6]. Таким образом, в настоящее время моделирование расхода электроэнергии электробусом является одной из важнейших научно-практических задач в области эксплуатации рассматриваемых транспортных средств. Их разработка направлена на обоснование оптимального расположения зарядной инфраструктуры на маршруте, на создание стратегического плана перехода к электробусам, на совершенствование существующих систем накопления энергии и тяговых электродвигателей.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В Российской Федерации количество эксплуатируемых на городских маршрутах электробусов ежегодно увеличивается [14].

Наложено производство ряда отечественных моделей. В данной работе исследованы показатели электробуса КамАЗ 6282, который выбран в качестве примера (рисунок 2), в результате численного моделирования его движения в условиях ездового цикла SORT 2: MIXED<sup>3</sup> в смешанных или легких городских режимах (рисунок 3). Для определения путевого расхода топлива автобусов категории  $M_3$  в городских и загородных условиях применяются ездовые циклы<sup>4</sup>. Принятый цикл обусловлен тем, что производитель электробуса его запас хода приводит именно в условиях SORT 2: MIXED<sup>2</sup>. Это в ходе выполненного численного исследования позволило ориентироваться на соответствующие параметры серийного автомобиля и оценить их изменение при внедрении рекомендуемых конструктивных мероприятий, предложенных в выполненной работе. Кроме того, расчёт показателей автомобиля в условиях цикла SORT 2: MIXED является менее трудоемким ввиду меньшего количества ограничений к допустимым диапазонам режимных параметров силовой установки в процессе разгона. Подобный подход для определения затрат энергии для движения электробуса выбран в работах [2, 3, 6] и отличается от исследования [15], в котором моделирование выполнено без учёта ездовых циклов или фактических параметров движения на маршруте: интервала [1], средней скорости, а также влияния светофорного регулирования и других участников движения.



Рисунок 2 – Общий вид электробуса КамАЗ 6282<sup>2</sup>

Figure 2 – General view of KAMAZ 6282 electric bus<sup>2</sup>

<sup>3</sup> Standardised On-Road Test Cycles – SORT. A project of the UITP Bus Committee in a collaboration with manufactures. 54th UITP International Congress, London, 2001. Access mode: [Электронный ресурс] Режим доступа. URL: [http://ec.europa.eu/environment/archives/clean\\_bus/slides/etienne\\_sort.pdf](http://ec.europa.eu/environment/archives/clean_bus/slides/etienne_sort.pdf) (Дата обращения: 10.10.2023)

<sup>4</sup> ГОСТ Р 54810–2011. Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2012. 23 с.

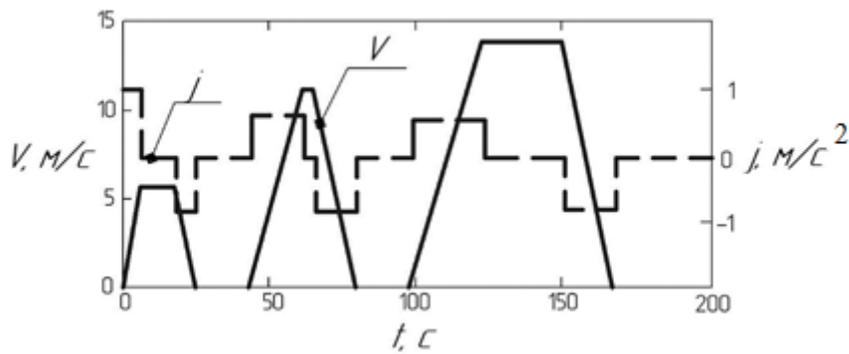


Рисунок 3 – Ездовой цикл SORT 2: MIXED: график зависимости скорости движения электробуса  $V$ , от времени  $t$ , график зависимости ускорения  $j$  от времени  $t^3$

Figure 3 – SORT 2: MIXED test cycle: graph of electric bus speed  $V$  versus time  $t$ , graph of acceleration  $j$  versus time  $t^3$

С помощью программного пакета Mathcad разработаны модели характеристик АТС: механическая характеристика ТЭД при полной нагрузке,  $M_1=f(\omega)$ , рисунки 4,5; характеристика КПД ТЭД (3); требуемая мощность на ведущих колесах по ездовому циклу  $N_T=f(t)$ , (1), рисунок 6. По результатам численного моделирования

процесса движения электробуса в условиях ездового цикла SORT 2: MIXED определены зависимости частоты вращения ротора ТЭД  $n_D$  (2), коэффициента использования мощности  $k_1$ , коэффициента полезного действия на номинальном режиме  $\eta_m$  и электрической мощности на ТАБ Р (4) от времени движения

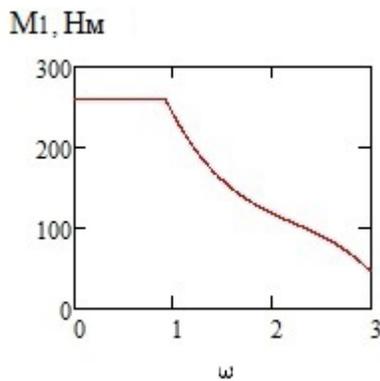


Рисунок 4 – Зависимость крутящего момента, создаваемого электродвигателем при полной нагрузке  $M_1$ , от относительной частоте вращения ротора  $\omega$   
Источник: составлено авторами.

Figure 4 – Dependence of torque generated by electric motor at full load of  $M_1$  on relative to rated speed of  $\omega$  rotor.  
Source: compiled by the authors.

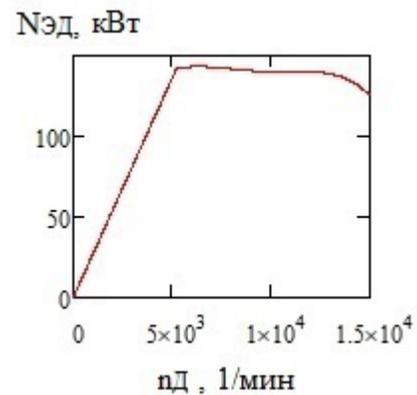


Рисунок 5 – Зависимость механической мощности  $N_{ЭД}$ , развиваемой электродвигателем, от частоты вращения ротора  $n_{Д1}$  при полной нагрузке  
Источник: составлено авторами.

Figure 5 – Dependence of  $N_{ЭД}$  mechanical power developed by electric motor on  $n_{Д1}$  rotor speed at full load.  
Source: compiled by the authors.

Таблица 1  
Основные характеристики электробуса КамАЗ 6282<sup>2</sup>

Table 1  
Main characteristics of KAMAZ 6282 electric bus<sup>2</sup>

Параметры и показатели	Обозначение	Ед. измер.	КамАЗ 6282
Данные в соответствии с НТД			
Время полной (быстрой) зарядки	-	мин	45 (12)
Пассажировместимость	-	чел.	85
Полная масса АТС	$m_a$	кг	18000
Максимальная скорость	-	км/ч	80
Запас хода на электротяге	-	км	90 (SORT 2)
Рекуперативное торможение	-	-	да
Тип ТЭД	-	-	асинх (к.з. ротор)
Мощность ТЭД номинальная	-	кВт	2 x 125
Охлаждение ТЭД	-	-	жидкостное
Тип и ёмкость ТАБ	-	кВт·ч	NMC, 201
Расчетные данные			
Полиномиальные коэффициенты механической характеристики ТЭД	$a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, a_2, b_2, c_2, d_2, e_2$		693,72; -669,01; 275,64221; -41,316; -0,038321; 693,72; -669,01; 275,64221; -41,316; -0,038321
Максимальная частота вращения ротора	$n_{max1}$	1/мин	17000
Максимальный крутящий момент	$M_{1max}$	Н·м	260
Номинальная частота вращения ротора	$K_{r1} \cdot n_{ЭМ}$	рад/с	3·283
КПД на номинальном режиме	$\eta_n$	-	0,9
Фактор обтекаемости	$W_1$	-	3,863
Коэффициент учета вращающихся масс	$\delta_1$	-	1,1

Требуемая мощность на ведущих колесах в ездовом цикле:

$$N_{\tau}(t) = \frac{[m_a \cdot 9,81 \cdot 0,013 \cdot V(t) + W_1 \cdot (V(t))^3 + m_a \cdot j(t) \cdot V(t) \cdot \delta_1]}{1000}, \quad (1)$$

$$n_d(t) = \frac{V(t) \cdot U_1 \cdot U_2}{0,105 \cdot r_k}, \quad (2)$$

$$\eta_m(t) = 1 + \frac{1}{P_0 + 1} \cdot \left( \frac{1}{\eta_n} - 1 \right) \cdot \frac{P_0 \left( \frac{n_d(t) \cdot K_N}{n_{max1}} \right)^2 + (K_1(t))^2}{K_1(t) \cdot \frac{n_d(t) \cdot K_N}{n_{max1}}}, \quad (3)$$

где  $P_0$  – относительная мощность потерь в электрической машине ( $P_0 = 0,12$ );

$K_N$  – коэффициент кратности частоты вращения ( $K_N = 3$ ).

$$P(t) = \begin{cases} \frac{N_{\tau}(t)}{\eta_m(t) \cdot \eta_T \cdot \eta_{И}} \cdot N_{\tau}(t) > 0, \text{ тяговый режим} \\ (N_{\tau}(t) \cdot \eta_m(t) \cdot \eta_T \cdot \eta_{И}) \text{ if } N_{\tau}(t) < 0, \text{ рекуперация} \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

где  $\eta_T$  – КПД трансмиссии силовой установки электробуса,  $\eta_{И}$  – КПД электрического преобразователя электрической машины.

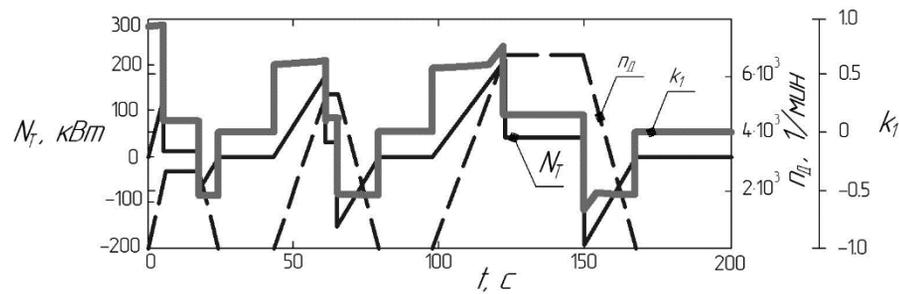


Рисунок 6 – Требуемая мощность  $N_T$  на ведущих колесах, частота вращения ротора электродвигателя  $n_d$  и коэффициент использования мощности электродвигателей  $k_1$  по ездовому циклу SORT 2  
Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Required  $N_T$  power on drive wheels, rotor speed of electric motor  $n_d$  and power utilization factor of electric motors  $k_1$  on the SORT 2 test cycle  
Source: compiled by the authors.

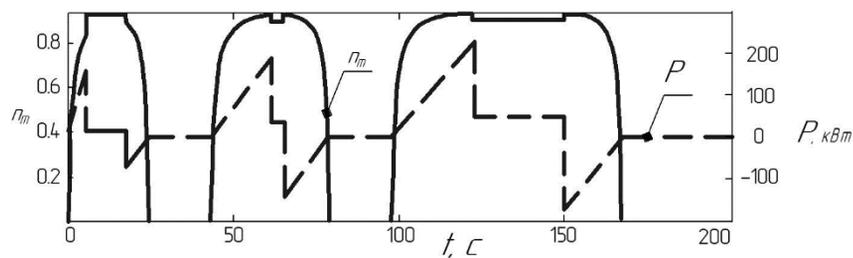


Рисунок 7 – Зависимости КПД электрической машины  $\eta_m$  и электрической мощности  $P$  на ТАБ от времени  $t$  в ездовом цикле SORT 2. Положительные участки – разрядка батареи, отрицательные – зарядка (рекуперация)  
Источник: составлено авторами.

Figure 7 – Dependences of efficiency of electric motor  $\eta_m$  and electric power  $P$  on the battery on the time  $t$ , in driving cycle SORT 2. Positive areas - battery discharge, negative areas - charging (recovery).  
Source: compiled by the authors.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам численного моделирования установлено, что с учетом рекуперации для прохождения цикла SORT 2 протяженностью которого 920 м, рассматриваемому электробусу КамАЗ 6282 требуется 3972 кДж электрической энергии, что эквивалентно 389 МДж в перерасчете на пробег 90 км, который является нормативным запасом хода электробуса (полученные данные хорошо соотносятся с результатами работы [15], в которой на 100 м участка пути, включающего разгон, постоянную скорость и замедление с рекуперацией, приходится 238 кДж затраченной энергии для

электробуса, построенного на шасси ЛиАЗ 5292.30, имеющего схожие с КамАЗ 6282 массогабаритные параметры, а также с результатами пассивного эксперимента работы [14], согласно которой, на 100 м пути приходится 360 кДж при оптимальной для электробусов [7] температуре окружающего воздуха 20 °С и средней скорости движения 19 км/ч, что близко к соответствующему параметру цикла SORT 2: 17,871 км/ч; в работе [1] колебания средней скорости при натурных испытаниях составили в пределах 16–28 км/ч). Принимая во внимание ёмкость ТАБ 720 МДж, разница запасенной и расходуемой на тяговый привод электрической энергии составляет 331 МДж (рисунок 8, а, 1).

Таблица 2  
Основные физико-химические параметры  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  [16]

Table 2  
The main physical and chemical parameters of the  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  [16]

Параметр	Обозначение	Ед. измер.	Значение
Температура фазового перехода	$t_L$	°С	32,5
Максимальная температура жидкой фазы	$t_{\max}$	°С	50
Минимальная температура твердой фазы	$t_{\min}$	°С	20
Удельная теплота плавления	$q_{\text{фаз.пер}}$	Дж/г	254
Масса кристаллогидрата	m	кг	1532
Удельная теплоемкость жидкой фазы	$c_{\text{рж}}$	Дж/г·°С	3,26
Удельная теплоемкость твердой фазы	$c_{\text{рт}}$	Дж/г·°С	1,92

В настоящем исследовании принята упрощенная расчётная модель потребления электрической энергии системой терморегуляции, в соответствии с которой мощность этой системы постоянна в течение всего времени движения и стоянки. Таким образом, если приводная механическая мощность электродвигателя системы терморегуляции кабины водителя и пассажирского салона, рабочий процесс которой основан на принципе теплового насоса, серийного электробуса составляет 7,5 кВт (что эквивалентно 20 кВт тепловой мощности и соответствует данным, содержащимся в источниках [2, 3] для холодных и экстремально холодных условий), то при условии её постоянной работы на маршруте протяженностью 90 км по циклу SORT 2 в течение 5 ч, для питания двигателя потребуется 171 МДж электрической энергии из ТАБ. Остаток составляет 160 МДж, доля которого при движении автобуса расходуется на привод дополнительного оборудования (внешнее и внутреннее освещение, система сигнализации, радиооборудование, привод тормозного и рулевого управления, вспомогательный электрический отопитель) и который частично обусловлен принятыми в исследовании допущениями и некоторым несовершенством математических моделей.

С целью более рационального расхода электрической энергии предлагается установка системы терморегуляции пассажирского салона и рабочего места водителя на основе ТА с ФПТАМ, что позволит уменьшить нагрузку на ТАБ. В качестве примера приведем предварительный расчет ТА на основе декагидрата сульфата натрия ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ), таблица 2.

При охлаждении 1 кг декагидрата сульфата натрия от +50 до +20 °С выделяющаяся удельная теплота составляет 93 Вт·ч/кг. Так как для 1 м<sup>3</sup>  $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$  масса составляет 1330 кг, то она аккумулирует  $1330 \cdot 334,86 = 445$  МДж теплоты. Если максимальная температура +90 °С, то удельная теплота уже составит 129,1 Вт·ч/кг. Тогда для 1 м<sup>3</sup> при той же массе она аккумулирует  $1330 \cdot 465,26 = 618,8$  МДж теплоты.

Аналогично теплота, поглощаемая при нагревании 1 кг декагидрата сульфата натрия от 20 до 50 °С (принимая удельную теплоемкость жидкости  $\approx 3$  кДж/кг) составляет 347,96 кДж/кг. В этом случае для 1 м<sup>3</sup> масса составит  $\approx 1420$  кг. Эта масса аккумулирует  $1420 \cdot 347,96 = 494$  МДж теплоты.

Тепловой насос серийного электробуса обеспечивает максимальную тепловую мощность до 38 кВт (мощность компрессора – до 9,6 кВт, вентиляторов – до 2,5 кВт). Итого электрическая мощность  $\sim 12$  кВт.

Теплота, получаемая за 3 ч работы, – 410,4 МДж (расход электроэнергии  $\sim 36$  кВт·ч). Это 18% емкости батареи (200 кВт·ч). Таким образом, тепловой аккумулятор массой  $\sim 600$  кг позволит отказаться от теплового насоса и сэкономить электроэнергию для работы тяговых электродвигателей.

Установка агрегатов системы отопления на основе ФПТАМ ввиду их меньшей удельной энергоёмкости повлечет увеличение снаряженной массы электробуса даже при условии снижения ёмкости и, как следствие, массы ТАБ, как это следует из варианта III рисунка 8, а.

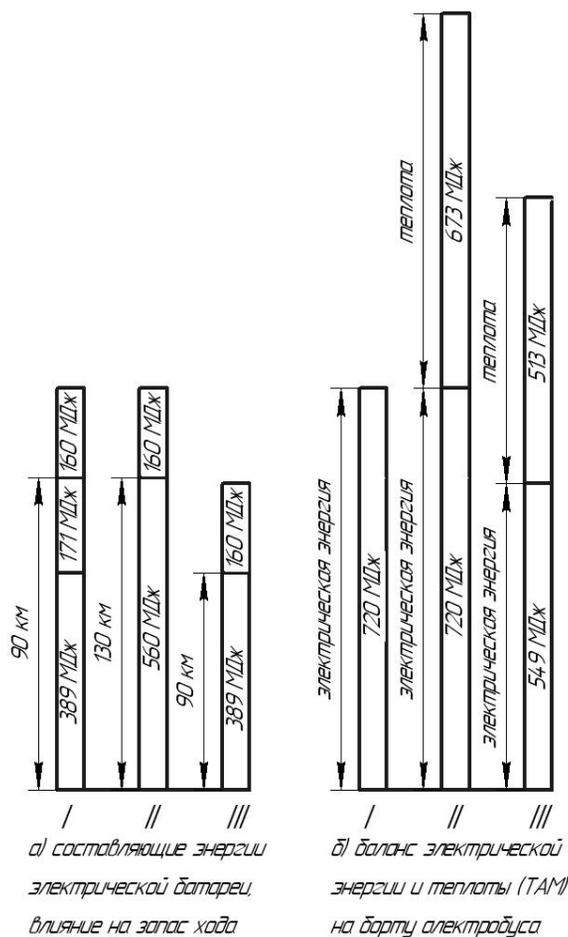


Рисунок 8 – Составляющие энергии ТАБ при работе электробуса на маршруте: I – серийный электробус, для отопления применяется тепловой насос; II – для отопления применена система на основе ФПТАМ; III – для отопления применена система на основе ФПТАМ, емкость тяговой батареи снижена  
Источник: составлено авторами.

Figure 8 – Components of the battery energy during the operation of the electric bus on the route: I is a serial electric bus, a heat pump is used for heating; II - a system based on PFTAM is used for heating; III - a system based on PFTAM is used for heating, the capacity of the traction battery is reduced.  
Source: compiled by the authors.

Сопутствующей проблемой является дополнительное потребление энергии для нагрева контейнера с ФПТАМ при стоянке электробуса, в течение которой также заряжается и ТАБ. Нагрев может осуществляться с помощью различных источников теплоты: твердое, углеводородное топливо, в т.ч. природный газ, или электрическая энергия. В последнем варианте, несмотря на существенную экономию расхода энергии от электрической батареи в процессе движения, значительно возрастает ее потребление на стоянке электробуса. Со-

ответствующие данные для рассматриваемых случаев показаны на рисунке 8, б: I – серийный электробус; II, III – увеличение потребления электрической энергии в 1,9 раза на единицу пройденного пути.

## ВЫВОДЫ

Установка предлагаемой системы на основе ФПТАМ при условии обеспечения запаса хода электробуса на уровне серийной модели, по результатам выполненного математического моделирования, позволяет уменьшить ёмкость ТАБ на 24% (до 549 МДж, см. рисунок 8, а, III), или при сохранении ёмкости 720 МДж увеличить запас хода на 44% – до 130 км, см. рисунок 8, а, II. Полученные результаты могут быть уточнены при использовании расчётной модели, приведенной в работах [3, 2], а также моделей глубокого обучения в соответствии с [6]. Кроме того, запас хода может быть увеличен при дополнительном использовании для обогрева пассажирского салона и рабочего места водителя теплоты, выделяемой при работе электродвигателей [2].

Таким образом, подобное решение вызывает практически удвоенную среднюю нагрузку на городскую электрическую сеть и может считаться рациональным с таких позиций:

- длительная ночная зарядка позволяет использовать более дешёвый тариф;
- применение неэлектрических источников теплоты;
- выбор рациональной ёмкости электрических батарей с учетом их стоимости.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sebastiani M., LUDers R., & Fonseca K. Evaluating Electric Bus Operation for a Real-World BRT Public Transportation Using Simulation Optimization. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2016; 17: 2777-2786. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2525800>.
2. Broatch A., Olmeda P., Bares P., & Aceros, S. Integral Thermal Management Studies in Winter Conditions with a Global Model of a Battery-Powered Electric Bus. Energies. 2022. <https://doi.org/10.3390/en16010168>.
3. El-Taweel, N., Zidan, A., & Farag, H. Novel Electric Bus Energy Consumption Model Based on Probabilistic Synthetic Speed Profile Integrated With HVAC. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2021; 22: 1517-1531. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2971686>.
4. Yang C., Li L., You S., Yan B., & Du X. Cloud computing-based energy optimization control framework for plug-in hybrid electric bus. Energy. 2017; 125: 11-26. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.02.102>

5. Савенков Н.В., Скрпкарь В.Г., Энтина Л.Э. Повышение топливной экономичности городских автобусов на основе исследования режимов движения на маршрутах // Вестник Донецкого национального технического университета. 2019. № 3 (17). С. 34–41.

6. Pamula T., & Pamula, D. Prediction of Electric Buses Energy Consumption from Trip Parameters Using Deep Learning. *Energies*. 2022. <https://doi.org/10.3390/en15051747>

7. Iclodean, C., Cordos, N., & Todoru J, A. Analysis of the Electric Bus Autonomy Depending on the Atmospheric Conditions. *Energies*. 2019. <https://doi.org/10.3390/en12234535>

8. Hnatov A. S., Arhun, S. Ponikarovska Energy Saving Technologies for Urban Bus Transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017; Vol. 14, No 4: 4649–4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>.

9. Comparative Analysis of Cost, Emissions and Fuel Consumption of Diesel, Natural Gas, Electric and Hydrogen Urban Buses / P. Muñoz [et al.]. *Energy Conversion and Management*. 2022; Vol. 2571: 115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>.

10. Chikishev E. Impact of Natural and Climatic Conditions on Electric Energy Consumption by an Electric City Bus. *Transportation Research Procedia*. 2021; Vol. 57: 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.032>.

11. Gorbunova A. I. Anisimov, E. Magaril Studying the Formation of the Charging Session Number at Public Charging Stations for Electric Vehicles. *Sustainability (Switzerland)*. 2020; Vol. 12, No 14: 5571. <https://doi.org/10.3390/su12145571>

12. Bezruchonak A. Geographic Features of Zero-Emissions Urban Mobility: the Case of Electric Buses in Europe and Belarus. *European Spatial Research and Policy*. 2019; Vol. 26, No 1: 81–99. <https://doi.org/10.18778/1231-1952.26.1.05>.

13. Kremer P. Active Cell Balancing for Life Cycle Extension of Lithium-Ion Batteries under Thermal Gradient. *Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design*. 2021–July. 2021: 9502500. <https://doi.org/10.1109/ISLPED52811.2021.9502500>.

14. Gorbunova, A., & Smirnova, O. Model of the influence of the speed of communication and ambient temperature on the electric power consumption of an electric bus. *Intelligence. Innovations. Investment*. 2022. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-1-84>.

15. Kotiev G., Butarovich D., & Kositsyn B. Energy efficient motion control of the electric bus on route. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018: 315. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/315/1/012014>

16. Мозговой А.Г., Шпильрайн Э.Э., Дибиров М.А., Бочков М.М., Левина Л.Н., Кенисарин М.М. Теплофизические свойства теплоаккумулирующих материалов. Кристаллогидраты: Обзоры по теплофизическим свойствам веществ // ТФЦ. М.: ИВТАН. 1990. № 2(82). С. 3–105.

## REFERENCES

1. Sebastiani M., LUDers R., & Fonseca K. Evaluating Electric Bus Operation for a Real-World BRT Public Transportation Using Simulation Optimization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2016; 17: 2777–2786. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2525800>

2. Broatch A., Olmeda P., Bares P., & Aceros, S. Integral Thermal Management Studies in Winter Conditions with a Global Model of a Battery-Powered Electric Bus. *Energies*. 2022. <https://doi.org/10.3390/en16010168>

3. El-Taweel, N., Zidan, A., & Farag, H. Novel Electric Bus Energy Consumption Model Based on Probabilistic Synthetic Speed Profile Integrated With HVAC. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2021; 22: 1517–1531. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.2971686>

4. Yang C., Li L., You S., Yan B., & Du X. Cloud computing-based energy optimization control framework for plug-in hybrid electric bus. *Energy*. 2017; 125: 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.1025>

5. Savenkov N.V. Skrpkar V.G., Entina L.E. For the question of creating the modification rows of operated city buses for increasing the fuel efficiency on passenger routes within the model group. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2019; 3 (17): 34–41. (in Russ.)

6. Pamula T., & Pamula, D. Prediction of Electric Buses Energy Consumption from Trip Parameters Using Deep Learning. *Energies*. 2022. <https://doi.org/10.3390/en15051747>

7. Iclodean C., Cordos N., & Todoru J, A. Analysis of the Electric Bus Autonomy Depending on the Atmospheric Conditions. *Energies*. 2019. <https://doi.org/10.3390/en12234535>

8. Hnatov A. S., Arhun S. Ponikarovska Energy Saving Technologies for Urban Bus Transport. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2017; 14, No 4: 4649–4664. <https://doi.org/10.15282/ijame.14.4.2017.5.0366>

9. Muñoz P. Comparative Analysis of Cost, Emissions and Fuel Consumption of Diesel, Natural Gas, Electric and Hydrogen Urban Buses / [et al.]. *Energy Conversion and Management*. 2022; Vol. 2571:115412. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115412>

10. Chikishev E. Impact of Natural and Climatic Conditions on Electric Energy Consumption by an Electric City Bus. *Transportation Research Procedia*. 2021; Vol. 57:113–121. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.09.032>

11. Gorbunova A.I., Anisimov E. Magaril Studying the Formation of the Charging Session Number at Public Charging Stations for Electric Vehicles. *Sustainability (Switzerland)*. 2020; Vol. 12, No 14: 5571. <https://doi.org/10.3390/su12145571>

12. Bezruchonak A. Geographic Features of Zero-Emissions Urban Mobility: the Case of Electric Buses in Europe and Belarus. *European Spatial Research and Policy*. 2019; Vol. 26, No 1: 81–99. <https://doi.org/10.18778/1231-1952.26.1.05>

13. Kremer P. Active Cell Balancing for Life Cycle Extension of Lithium-Ion Batteries under Thermal Gradient. *Proceedings of the International Symposium on Low Power Electronics and Design*. 2021–July. 2021: 9502500. <https://doi.org/10.1109/ISLPED52811.2021.9502500>.

14. Gorbunova A., & Smirnova O. Model of the influence of the speed of communication and ambient temperature on the electric power consumption of an electric bus. *Intelligence. Innovations. Investment*. 2022. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2022-1-84>

15. Kotiev G., Butarovich, D., & Kositsyn, B. Energy efficient motion control of the electric bus on route. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 315. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/315/1/012014>

16. Mozgovoy A.G. Thermophysical properties of heat storage materials. *Crystallohydrates: Reviews on the thermophysical properties of substances*. *TFZ*. 1990; 2(82): 3-105. (in Russ.)

### ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

*Горожанкин С.А. Научное сопровождение при подготовке статьи, получение результатов и их анализ.*

*Савенков Н.В. Основная работа по исследованию и сбору информации для составления статьи. Постановка задачи, анализ результатов.*

*Соболь О.В. Методическое сопровождение при подготовке статьи. Оформление материала.*

*Моржухин А.М. Сбор информации для составления статьи.*

### STATED CONTRIBUTION OF AUTHORS

*Sergey A. Gorozhankin Scientific support in the preparation of the article, obtaining results and their analysis.*

*Nikita V. Savenkov Main work on the research and collection of information for the preparation of the article. Task setting, analysis of results.*

*Oksana V. Sobol Methodological support in the preparation of the article. Material design.*

*Artyom M. Morzhukhin Gathering information to compile the paper.*

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Горожанкин Сергей Андреевич – д-р техн. наук, проф. кафедры «Автомобильный транспорт, сервис и эксплуатация» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286123, г. о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-881X>, SPIN-код: 8491-9429, e-mail: [s.a.gorozhankin@donnasa.ru](mailto:s.a.gorozhankin@donnasa.ru)*

*Савенков Никита Владимирович – канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт, сервис и эксплуатация» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286123, г. о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3803-9528>, SPIN-код: 8826-7511, e-mail: [n.v.savenkov@donnasa.ru](mailto:n.v.savenkov@donnasa.ru)*

*Соболь Оксана Викторовна – канд. хим. наук, доц. кафедры «Физика и прикладная химия» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры (286123, г. о. Макеевский, г. Макеевка, ул. Державина, д. 2), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6871-8671>, SPIN-код: 5894-9911, e-mail: [o.v.sobol@donnasa.ru](mailto:o.v.sobol@donnasa.ru)*

*Моржухин Артём Маркович – старший преподаватель кафедры «Химия, новые технологии и материалы» Государственного университета Дубна (141980 г. Дубна Московской обл., ул. Университетская, 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4584-347X>, e-mail: [kafchem@uni-dubna.ru](mailto:kafchem@uni-dubna.ru)*

*Моржухин Артём Маркович – старший преподаватель кафедры «Химия, новые технологии и материалы» Государственного университета Дубна (141980 г. Дубна Московской обл., ул. Университетская, 19), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4584-347X>, e-mail: [kafchem@uni-dubna.ru](mailto:kafchem@uni-dubna.ru)*

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Sergey A. Gorozhankin – Dr. of Sci., Professor of the Automobile Transport, Service and Operation Department, Donbas National Academy of Engineering and Architecture (2 Derzhavina Makeyevskii, Makeyevka, 286123), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-881X>, SPIN-kod: 8491-9429, e-mail: [s.a.gorozhankin@donnasa.ru](mailto:s.a.gorozhankin@donnasa.ru)*

*Nikita V. Savenkov – Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Automobile Transport, Service and Operation Department, Donbas National Academy of Engineering and Architecture (2 Derzhavina Makeyevskii, Makeyevka, 286123) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3803-9528>, SPIN-kod: 8826-7511, e-mail: [n.v.savenkov@donnasa.ru](mailto:n.v.savenkov@donnasa.ru)*

*Oksana V. Sobol – Cand.e of Sci., Associate Professor of the Physics and Applied Chemistry Department, Donbas National Academy of Engineering and Architecture (2 Derzhavina Makeyevskii, Makeyevka, 286123), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6871-8671>, SPIN-kod: 5894-9911, e-mail: [o.v.sobol@donnasa.ru](mailto:o.v.sobol@donnasa.ru)*

*Artyom M. Morzhukhin – Senior Lecturer at the Chemistry, New Technologies and Materials Department, Dubna State University (19 Universitetskaya, Dubna 141980) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4584-347X>, e-mail: [kafchem@uni-dubna.ru](mailto:kafchem@uni-dubna.ru)*