

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

*«Вестник Полоцкого государственного университета»
продолжает традиции первого в Беларуси литературно-
научного журнала «Месячник Полоцкий».*

№ 2(52), 2025

ВЕСТНИК ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Серия В. Промышленность. Прикладные науки

В серии В научно-теоретического журнала публикуются статьи, прошедшие рецензирование, содержащие новые научные результаты в области машиноведения и машиностроения, транспорта и химических технологий.

ВЕСНІК ПОЛАЦКАГА ДЗЯРЖАЎНАГА ЎНІВЕРСІТЭТА
Серыя В. Прамысловасць. Прыкладныя навукі

У серыі В навукова-тэарэтычнага часопіса друкуюцца артыкулы, якія прайшлі рэцэнзаваанне, змяшчаюць новыя навуковыя вынікі ў галіне машыназнаўства і машынабудавання, транспарту і хімічных тэхналогій.

HERALD OF POLOTSK STATE UNIVERSITY
Series B. Industry. Applied sciences

Series B includes reviewed articles which contain novelty in research and its results in machine science and mechanical engineering, transport and chemical engineering.

Журнал входит в Российский индекс научного цитирования.
Электронная версия номера размещена на сайте: <https://journals.psu.by/industry>

Адрес редакции:
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Беларусь
тел. + 375 (214) 59 95 44, e-mail: vestnik@psu.by

Отв. за выпуск *В.П. Иванов.*
Редактор *Т.А. Дарьянова.*

Подписано к печати 27.08.2025. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84¹/₈. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 16,82. Тираж 50 экз. Заказ 330.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.3

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-2-7

**ПУТИ СНИЖЕНИЯ НАГРУЖЕННОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ
СО СЛОЖНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ***д-р техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
Белорусско-Российский университет, Могилев)*

Рассмотрены вопросы, связанные с анализом нагруженности механических и гидромеханических передач (МГМП) со сложным движением звеньев. Установлено, что основным механизмом повреждения зубчатых передач МГМП в условиях повышенной виброн нагруженности является многоцикловая усталость материала. Выявлены особенности возбуждения крутильных и изгибных колебаний в высоконагруженных передачах. Определено, что усталостная прочность обода наиболее критична при колебаниях ведомого колеса, характеризующихся двумя, тремя или четырьмя узловыми диаметрами.

Одним из путей снижения нагруженности зубчатых передач со сложным движением элементов является профильная модификация зубьев колес. Правильная модификация зубчатых колес оптимизирует работу зубчатой передачи под нагрузкой, снижая износ, тепловыделение, потери мощности, вибрации и шум. Другой путь снижения нагруженности зубчатых передач со сложным движением элементов – применение демпферов сухого трения, обеспечивающих снижение амплитуды крутильных колебаний в двигателях и трансмиссиях. Отмечается, что для эффективного снижения амплитуды резонансных колебаний зубчатого колеса, возникающих при совпадении рабочих частот с собственными, рекомендуется применение кольцевых или тарельчатых демпферов. Дана оценка амплитудно-частотной характеристики пиковых напряжений в ободке ведомого зубчатого колеса при наличии и отсутствии демпфирования.

Ключевые слова: гидромеханическая передача, механическая передача, мобильная машина, зубчатое зацепление, профильная модификация, демпфер сухого трения.

Введение. Работа зубчатых передач мобильной техники сопряжена с высокими динамическими нагрузками, которые являются фактором риска и снижают ресурс не только самих зубчатых передач, но и компонентов трансмиссии и силового агрегата. Отказы зубчатых передач и дефекты зубчатых колес в механических и гидромеханических передачах со сложной кинематической схемой и сложным движением звеньев могут привести к возникновению опасных режимов работы. Установлено, что основным механизмом повреждения зубчатых передач МГМП в условиях повышенной виброн нагруженности является многоцикловая усталость материала [1; 2].

Основная часть. Проведенные исследования цилиндрических и конических зубчатых передач (с использованием математического моделирования и испытательной базы завода «БелАЗ») позволили оценить влияние различных источников возбуждения колебаний на динамические нагрузки в трансмиссии. Были выявлены особенности возбуждения крутильных и изгибных колебаний в высоконагруженных передачах [3]. Результатом работы стали рекомендации по оптимизации параметров профильной модификации цилиндрических зубчатых передач и выбору конструкции и параметров (силы поджатия) демпфера сухого трения для конических зубчатых колес, направленные на снижение динамических нагрузок в зацеплении.

Тонкие диски с зубьями, как цилиндрические, так и конические, особенно чувствительны к вибрации вдоль оси. Зубчатые колеса-диски могут деформироваться при вибрации множеством различных способов. Каждой форме деформации соответствует своя собственная частота, при которой диск свободно колеблется. Самая низкая частота вызывает общие колебания диска, когда ни одна его часть не остается неподвижной. При следующей, более высокой, частоте возникает резонанс, и амплитуда колебаний резко возрастает. В этом случае появляется один неподвижный диаметр диска, называемый узловым.

Продолжая увеличивать частоту, можно достичь значений, при которых возникают колебания с двумя, тремя и более узловыми диаметрами. Кроме того, в дисках могут формироваться узловые кольца – окружности, которые не двигаются во время вибрации. Однако колебания с узловыми кольцами обычно не представляют большой угрозы для работы диска. Наиболее опасны колебания, возникающие при определенной критической скорости вращения, когда диск вибрирует с небольшим количеством узловых диаметров.

Исследования дефектов конических зубчатых колес, возникающих в процессе эксплуатации мобильных машин, выявили, что усталостная прочность обода наиболее критична при колебаниях ведомого колеса, характеризующихся двумя, тремя или четырьмя узловыми диаметрами [4; 5]. На рисунке 1 визуализированы перемещения и первые главные напряжения, возникающие в коническом зубчатом колесе при колебаниях с тремя узловыми диаметрами.

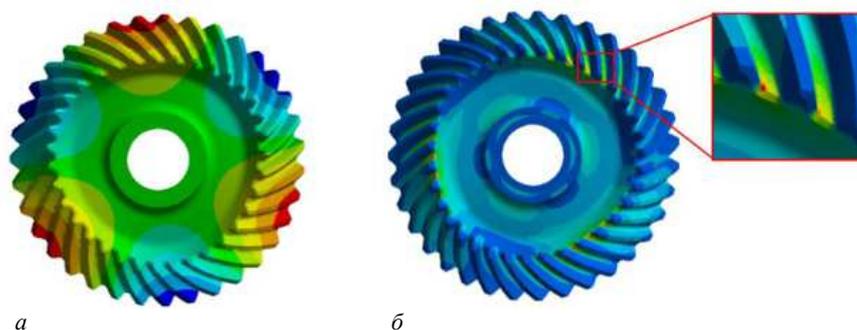
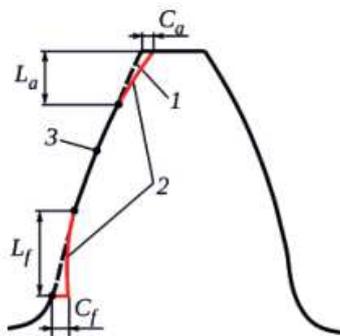


Рисунок 1. – Распределение перемещений (а) и первых главных напряжений (б) конического зубчатого колеса при колебаниях по узловым диаметрам

Одним из путей снижения нагруженности зубчатых передач со сложным движением элементов является профильная модификация зубьев колес, т.е. целенаправленное изменение формы зубьев зубчатых колес, предназначенное для оптимизации кинематики и динамики зацепления, повышения несущей способности элементов и обеспечения более надежной работы зубчатой передачи.

При профильной модификации зубьев зубчатых колес изменяют форму эвольвенты зуба для рационального распределения нагрузки в зацеплении. Это позволяет снизить контактные напряжения, компенсировать технологические отклонения и износ, а также уменьшить динамические нагрузки. В зависимости от формы отклонения эвольвенты, применяются различные типы модификаций, такие как линейная (короткая и длинная), параболическая и дуговая (рисунок 2). Неправильный выбор параметров профильной модификации может привести к ухудшению характеристик зубчатой передачи. Параметр C_a характеризует глубину фланка процесса модификации.



1 – исходный эвольвентный профиль; 2 – модифицированный профиль; 3 – полюс зацепления

Рисунок 2. – Короткая линейная модификация (фланкирование)

Локализация пиков напряжений в профиле для определения места, где нужна модификация, осуществляется посредством экспериментальных методов или с применением современных систем численного моделирования.

Правильная модификация зубчатых колес оптимизирует работу зубчатой передачи под нагрузкой, снижая износ, тепловыделение, потери мощности, вибрации и шум. Она также предотвращает концентрацию напряжений и снижает риск повреждений зубьев (задилов, микротрещин, выкрашивания).

В процессе математического моделирования совместно с учеными кафедры «Программное обеспечение информационных технологий» Белорусско-Российского университета (Могилев) было установлено, что уменьшение протяженности зоны двухпарного зацепления (рисунок 3) обусловлено как снижением коэффициента перекрытия ϵ , так и гармонизацией функции жесткости зацепления $k_m(j)$. Гармонизация проявляется в снижении амплитуды второй и высших гармоник в спектральном разложении $k_m(j)$ в ряд Фурье.

В цилиндрических зубчатых передачах без профильной модификации (при $\epsilon > 1,7$) жесткость однопарного зацепления превышает теоретическую жесткость контакта одной пары зубьев. Это обусловлено преждевременным возникновением кромочного контакта следующей пары зубьев. Введение профильной модификации с глубиной фланка $C_a > 15$ мкм приводит к снижению ϵ , что, в свою очередь, минимизирует жесткость однопарного зацепления (рисунок 3).

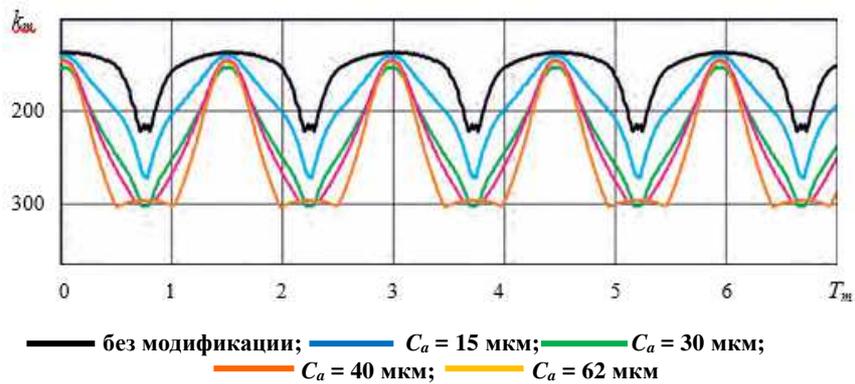


Рисунок 3. – Жесткость зацепления $k_m(j)$ цилиндрической передачи с различными параметрами профильной модификации

Модификация профиля зуба на 60 мкм, в соответствии с нормативной документацией, приводит к трехкратному увеличению амплитуды первой гармоники функции жесткости зацепления по сравнению с базовой конструкцией. Данное изменение влечет за собой рост динамических нагрузок в зоне контакта зубьев и, как следствие, увеличение амплитуды вибраций на гармониках зубцовой частоты.

Другой путь снижения нагруженности зубчатых передач со сложным движением элементов – демпферы сухого трения.

Демпферы сухого трения служат для снижения амплитуды крутильных колебаний в двигателях и трансмиссиях. Функционирование этих демпферов основано на использовании силы сухого трения, которая имеет нелинейную зависимость от скорости скольжения. Эта нелинейность, проявляющаяся в виде разрывной кривой, требует применения нелинейных дифференциальных уравнений при анализе динамики системы.

Основная особенность демпферов – наличие упругого элемента, допускающего относительное движение между его компонентами. Это движение вызывает силы трения, которые эффективно рассеивают энергию, подавляя колебания.

Широкий диапазон рабочих частот конических передач автосамосвалов БелАЗ (сателлиты дифференциала и главная передача) создает трудности в настройке для исключения резонансных явлений в ободе конического колеса. Резонанс в полотно зубчатого колеса может вызвать его разрушение. Для снижения амплитуды резонансных колебаний и, следовательно, уменьшения переменных напряжений предлагается применять демпфер сухого трения. Этот метод позволяет эффективно демпфировать колебания и вибрации.

Разнообразие конструкций демпферов сухого трения используется для демпфирования резонансных колебаний конических зубчатых колес. Рисунок 4 иллюстрирует результаты имитационного моделирования, показывающие зависимость амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) перемещения z_1 узла I от силы поджатия демпфера.

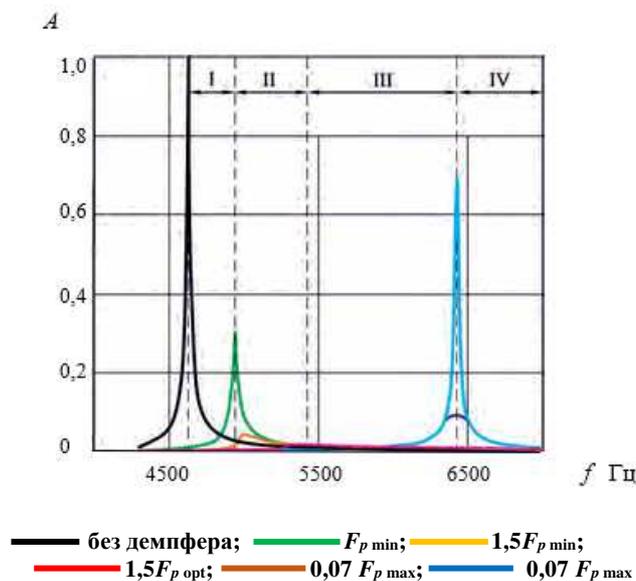
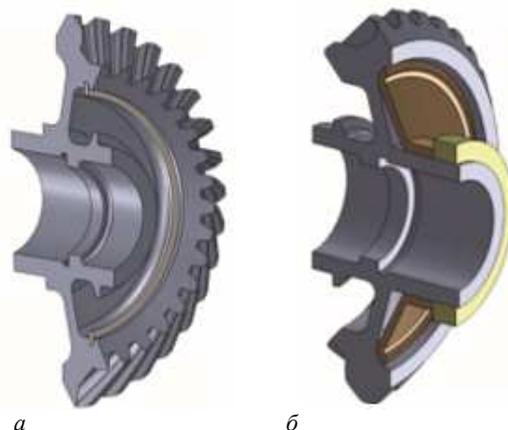


Рисунок 4. – Амплитудно-частотная характеристика системы при различной величине силы поджатия демпфера

Применение демпфера с оптимальной силой поджатия $F_{p\text{ опт}}$ приводит к уменьшению амплитуды колебаний на два порядка (примерно в 80 раз). Анализ амплитудно-частотной характеристики позволяет выделить четыре характерных режима работы демпфера: I (нештатный), характеризующийся отрывными колебаниями; II, в котором доминирует проскальзывание в зоне контакта; III, характеризующийся преобладанием длительных периодов относительной неподвижности; IV, представляющий собой полную блокировку демпфера, исключаящую проскальзывание.

Рисунок 5 показывает, как могут быть сконструированы фрикционные демпферы. Эти примеры включают кольцевой (рисунок 5, а) и тарельчатый (рисунок 5, б) типы.



а – кольцевой; б – тарельчатый

Рисунок 5. – Различные варианты конструкции фрикционного демпфера

Для эффективного снижения амплитуды резонансных колебаний зубчатого колеса, возникающих при совпадении рабочих частот с собственными, рекомендуется применение кольцевых демпферов (см. рисунок 5, а).

Конструктивно кольцевой демпфер представляет собой упругое кольцо, установленное с натягом в паз, выполненный на внутренней поверхности зубчатого венца. Натяг и центробежная сила обеспечивают плотный контакт демпфера с колесом. Демпфирование резонансных колебаний достигается за счет диссипации энергии посредством силы трения, возникающей между кольцом и шестерней при колебаниях последней по узловым диаметрам. Эффективность демпфирования напрямую зависит от соответствия положения паза и формы кольца ожидаемым формам резонансных колебаний, что обеспечивает максимальное трение в зоне контакта. Колебания шестерни вдоль узловых диаметров между кольцом и шестерней порождают силу трения, которая преобразует энергию резонансных колебаний в тепло. Тепло рассеивается в окружающую среду, обеспечивая тем самым демпфирование колебаний.

Тарельчатый демпфер – альтернативный вариант демпфера сухого трения, в котором используется упругая тарельчатая пружина. Эта пружина при помощи регулируемого упора (см. рисунок 5, б) создает усилие прижатия к торцу шестерни. Для оптимизации работы демпфера сухого трения необходимо исследовать влияние усилия поджатия на следующие параметры: режим работы демпфера, резонансную частоту механической системы, работу силы трения в демпфере и максимальную амплитуду колебаний при резонансе. Такое исследование позволяет определить оптимальное значение усилия поджатия, обеспечивающего минимальную амплитуду резонансных колебаний. Тарельчатые демпферы при рациональном выборе его параметров тоже проявляют хорошие свойства в плане снижения амплитуды резонансных колебаний зубчатых колес.

На рисунке 6 показан эскиз зубчатого колеса с интегрированным тарельчатым демпфером.

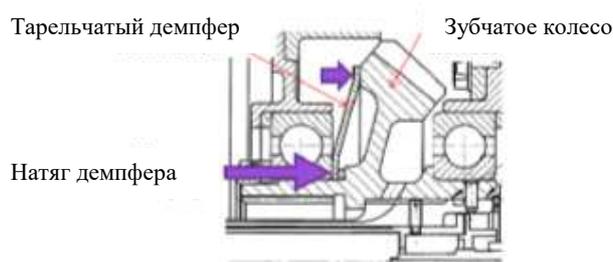


Рисунок 6. – Схема зубчатого колеса с интегрированным тарельчатым демпфером

На рисунке 7 дана оценка АЧХ пиковых напряжений в ободу ведомого зубчатого колеса при наличии и отсутствии демпфирования. Видно, что при наличии демпфирования максимальные напряжения в ободу зубчатого колеса значительно снижаются.

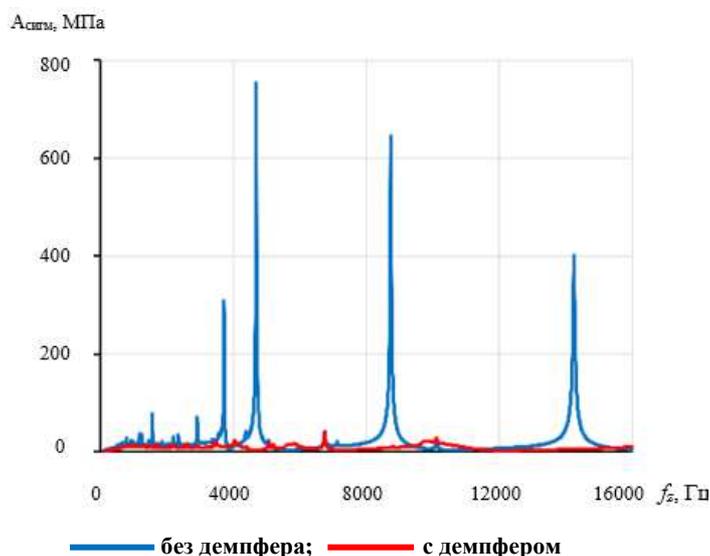


Рисунок 7. – Амплитудно-частотная характеристика максимальных напряжений в ободу ведомого зубчатого колеса без демпфирования и с демпфированием

При реализации демпфирования сухого трения очень важно установить взаимосвязь между параметром поджатия демпфера и его функциональными характеристиками, а также параметрами системы, включая резонансную частоту, работу силы трения и амплитуду резонансных колебаний. Оптимизация параметра поджатия, направленная на минимизацию амплитуды резонансных колебаний, является ключевой задачей.

Заключение. Установлено, что основной причиной повреждения зубчатых передач МГМП в условиях повышенной виброн нагруженности выступает многоцикловая усталость материала. Выявлены особенности возбуждения крутильных и изгибных колебаний в высоконагруженных передачах. Определено, что усталостная прочность обода наиболее критична при колебаниях ведомого колеса, характеризующихся двумя, тремя или четырьмя узловыми диаметрами.

Одним из путей снижения нагруженности зубчатых передач со сложным движением элементов является профильная модификация зубьев колес. Правильная модификация зубчатых колес оптимизирует работу зубчатой передачи под нагрузкой, снижая износ, тепловыделение, потери мощности, вибрации и шум. Другой путь снижения нагруженности зубчатых передач со сложным движением элементов – применение демпферов сухого трения для обеспечения снижения амплитуды крутильных колебаний в двигателях и трансмиссиях. Для эффективного снижения амплитуды резонансных колебаний зубчатого колеса, возникающих при совпадении рабочих частот с собственными, рекомендуется применение кольцевых демпферов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рынкевич С.А. Активный мониторинг сложных элементов гидромеханических передач мобильных машин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 1(49). – С. 71–78. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78
2. Рынкевич С.А. Классификация дефектов передач мобильных машин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 2(50). – С. 19–24. DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-19-24
3. Рынкевич С.А., Сонич О.А. Методика диагностирования зубчатых передач со сложным движением звеньев // Машиностроение: сб. – Минск: БНТУ, 2024. – Вып. 35. – С. 197–200.
4. Рынкевич С.А., Сонич О.А. Анализ отказов и испытания передач со сложным движением звеньев // Транспорт и транспортные системы: Конструирование, эксплуатация, технологии. – Минск: БНТУ, 2024. – Вып. 6. – С. 19–25.
5. Рынкевич С.А. Контроль механических и гидромеханических передач мобильных и технологических машин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2025. – № 1(51). – С. 13–19. DOI 10.52928/2070-1616-2024-51-1-13-19

REFERENCES

1. Rynkevich, S.A. (2024). Aktivnyi monitoring slozhnykh elementov gidromekhanicheskikh peredach mobil'nykh mashin [Active Monitoring of Complex Elements of Hydromechanical Transmissions of Mobile Machines]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science], 1(49), 71–78. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-71-78 (In Russ., abstr. in Engl.).

2. Rynkevich, S.A. (2024). Klassifikatsiya defektov peredach mobil'nykh mashin [Classification of Defects in Mobile Machine Transmissions]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 2(50), 19–24. DOI 10.52928/2070-1616-2024-50-2-19-24 (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Rynkevich, S.A. & Sonich, O.A. (2024). Methodology for diagnosing gear transmissions with complex movement of links. *Mechanical engineering: Iss. 35 (197–200)*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
4. Rynkevich, S.A. & Sonich, O.A. (2024). Failure analysis and testing of gears with complex link motion. *Transport i transportnye sistemy: konstruirovaniye, ekspluatatsiya, tekhnologii: Iss. 6 (19–25)*. Minsk: BNTU. (In Russ.)
5. Rynkevich, S.A. (2025). Kontrol' mekhanicheskikh i gidromekhanicheskikh peredach mobil'nykh i tekhnologicheskikh mashin [Control of Mechanical and Hydromechanical Transmissions of Mobile and Technological Machines]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 1(51), 13–19. DOI 10.52928/2070-1616-2024-51-1-13-19 (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 11.07.2025

WAYS TO REDUCE THE LOADING OF GEAR TRANSMISSIONS WITH COMPLEX MOVEMENT OF ELEMENTS

S. RYNKEVICH

(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;
Belarusian-Russian University, Mogilev*)

The article considers issues related to the analysis of the loading of mechanical and hydromechanical transmissions (MGMT) with complex movement of links. It has been established that the main mechanism of damage to MGMT gears under conditions of increased vibration loading is multi-cycle fatigue of the material. Features of excitation of torsional and bending vibrations in highly loaded transmissions have been identified. It has been established that the fatigue strength of the rim is most critical for vibrations of the driven wheel, characterized by two, three or four nodal diameters.

One of the ways to reduce the loading of gears with complex movement of elements is the profile modification of the teeth of the wheels. Correct modification of the gears optimizes the operation of the gear under load, reducing wear, heat generation, power losses, vibrations and noise. Another way to reduce the loading of gears with complex movement of elements is the use of dry friction dampers. Dry friction dampers provide a reduction in the amplitude of torsional vibrations in engines and transmissions. It is noted that for an effective reduction in the amplitude of resonant vibrations of a gear wheel, arising when the operating frequencies coincide with the natural ones, it is recommended to use ring or disc dampers. An assessment is given of the amplitude-frequency characteristic of peak stresses in the rim of a driven gear wheel with and without damping.

Keywords: *hydromechanical transmission, mechanical transmission, mobile machine, gear engagement, profile modification, dry friction damper.*

УДК 531.1+531.8+621.837.7:621.926.9+621.928.2

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-8-17

АГЛЯД АНАЛІТЫЧНЫХ МЕТАДАЎ КІНЕМАТЫЧНАГА АНАЛІЗУ ПРЫВАДНОГА МЕХАНІЗМА ЛАНЦУЖНАГА АГРЭГАТА

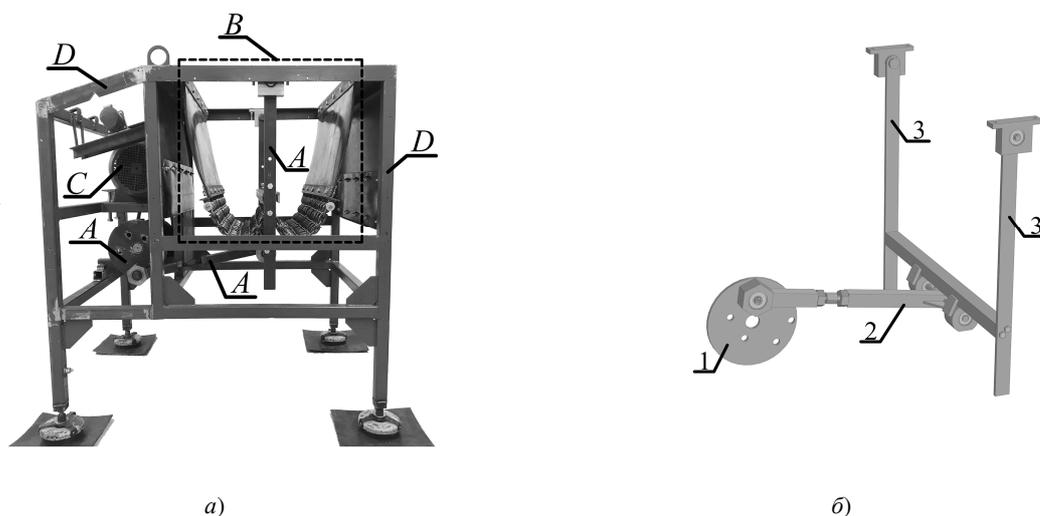
У.А. ПАТАПАЎ, канд. тэхн. навук, дац. С.І. РУСАН, Л.С. СІДОР
(Баранавіцкі дзяржаўны ўніверсітэт)
д-р тэхн. навук, праф. Л.А. СІВАЧЭНКА
(Беларуска-Расійскі ўніверсітэт, Магілёў)

Аўтарамі артыкула працягваецца пошук аптымальнага функцыянавання створанага імі эксперыментальнага абразца ланцужнага агрэгата. Галоўнымі часткамі ў яго структуры з'яўляюцца ланцужная рабочая камера і яе прывадны механізм. Рух ланцугоў рабочай камеры, а значыць, і дынамічнае ўздзеянне на рэчыва, якое падлягае апрацоўцы, залежыць ад кінематычных характарыстык руху звенняў прываднага механізма, найперш – крывашыпа і каромысла. Таму актуальнай з'яўляецца задача выбару алгарытма кінематычнага аналізу прываднага механізма. У даследаванні прыведзены вынікі агляду айчынных і замежных крыніц, у якіх падрабязна апісаны алгебраічны метады, метады замкнёнага вектарнага контура і пераўтварэння каардынат. Першы з іх грунтуецца на алгарытме тэарэтычнай механікі – напачатку з геаметрычнага аналізу схемы запісваюцца ўраўненні руху звенняў механізма, а затым вызначаюцца іх скорасці і паскарэнні як першая і другая вытворныя па часе. Паводле другога метаду ўраўненні руху механізма складаюцца з дапамогай замкнёнага вектарнага контура праз яго праекцыі на восі каардынат. Для кінематычнага аналізу разгледжана механізма таксама могуць прымяняцца метады пераўтварэння каардынат, трохвугольніка, групы Асура і базіснага вектара.

Ключавыя словы: ланцужны агрэгат, прывадны механізм, крывашыпа-каромыславы механізм, аналітычныя метады, кінематычны характарыстыкі.

Уступ. Чатырохзвенны шарнірны механізмы атрымалі шырокае распаўсюджанне ў тэхніцы. Адным з такіх з'яўляецца вядомы з курса тэорыі механізмаў і машын крывашыпа-каромыславы механізм [1–3]. Ён, у прыватнасці, выкарыстоўваецца ў перспектыўнай машыне для ажыццяўлення працэсаў драбнення і класіфікацыі матэрыялаў – ланцужным агрэгатам.

На рысунку 1 прадстаўлены эксперыментальны ўзор ланцужнага агрэгата і трохмерная мадэль прываднага механізма.



а – агульны выгляд; б – трохмерная мадэль прываднага механізма

Рысунак 1. – Эксперыментальны ўзор ланцужнага агрэгата і трохмерная мадэль прываднага механізма

Ланцужны агрэгат (гл. рысунак 1, а) уключае прывадны механізм А, рабочую камеру В, электрарухавік С, зманціраваны на раме D. Прывадны механізм (гл. рысунак 1, б) у сваю чаргу складаецца з уваходнага звяна – крывашыпа 1 і выходнага – каромысла 3, якія злучаны шатуном 2.

Кінематычная схема ланцужнага агрэгата можа быць прадстаўлена сукупнасцю трох чатырохзвенных механізмаў (рысунак 2) з агульным звязом 3.

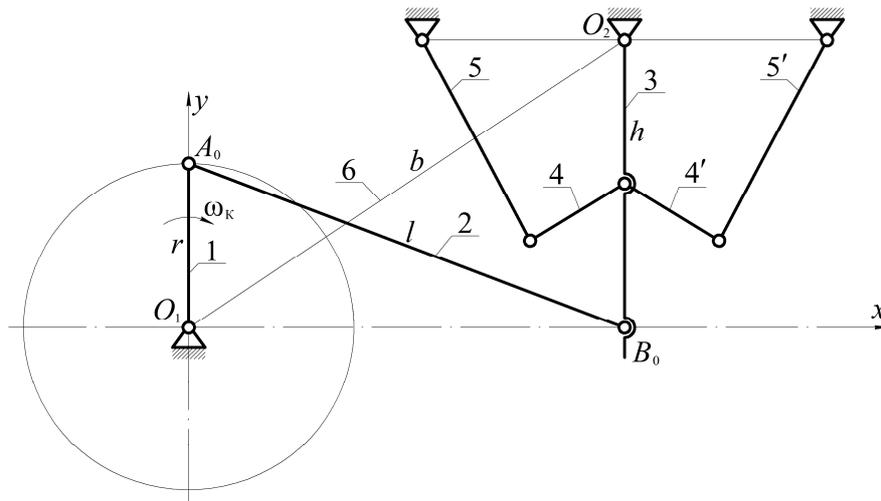


Рисунок 2. – Кінематичная схема ланцюжного агрегата з чотирохстрижневою моделлю робочої камери

На рисунку 2 механізми показані у початковому стані. Звенні 1, 2, 3, 6 адносяцца да прываднаго механізма, дзе рухомыя: O_1A_0 – кривашып; A_0B_0 – шатуна; O_2B_0 – каромысел; нерухомае O_1O_2 – стойка. Даўжыні кривашыпа, шатуна, каромысла і стойкі абазначым адпаведна літарамі: r , l , h і b . Кривашып 1 рухаецца з вуглавой скорасцю ω_k . Звеннямі 4, 5, 4', 5' мадэліруецца рабочая камера.

Пры праектаванні машыны ўзнікае неабходнасць вызначэння кінематычных характарыстык прываднаго механізма, якія выкарыстоўваюцца ў яго сілавым аналізе і ў даследаванні руху звенняў, што ўтвараюць рабочую камеру ланцюжнага агрегата.

Агляд літаратурных крыніц паказаў, што для кінематычнага аналізу механізмаў шырокую распаўсюджанасць атрымалі аналітычныя метады – метад замкнёных вектарных контураў [1; 3–7] і метад пераўтварэння каардынат [3; 5]. У навучальным дапаможніку [2] і іншых крыніцах, у прыватнасці, ў замежным выданні [6], прыведзены прыклады трэцяга метаду, які названы алгебраічным. Яго сутнасць заключаецца ў складанні ўраўненняў руху звенняў механізма і ў наступным іх дыферэнцыраванні па часе.

Нашае даследаванне ставіць на мэце агляд аналітычных метадаў кінематычнага аналізу механізмаў з распрацоўкай алгарытмаў на падставе некаторых з іх у дачыненні да прываднаго механізма ланцюжнага агрегата, а таксама аналіз змены адносных вуглавых скорасцей, паскарэнняў шатуна і каромысла ў функцыі вугла павароту кривашыпа пры розных геаметрычных суадносінах звенняў прываднаго механізма.

Асноўная частка. На рисунку 3 пабудаваны складаны вектарны контур для ланцюжнага агрегата з чатырохзвеннай моделлю робочай камеры. Ён уяўляе сукупнасць трох замкнёных вектарных контураў з агульным для робочай камеры вектарам \vec{h}' .

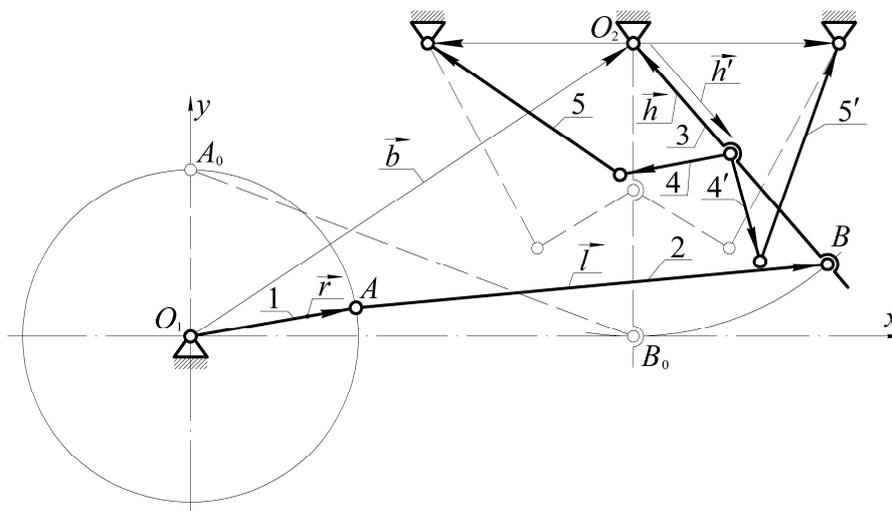
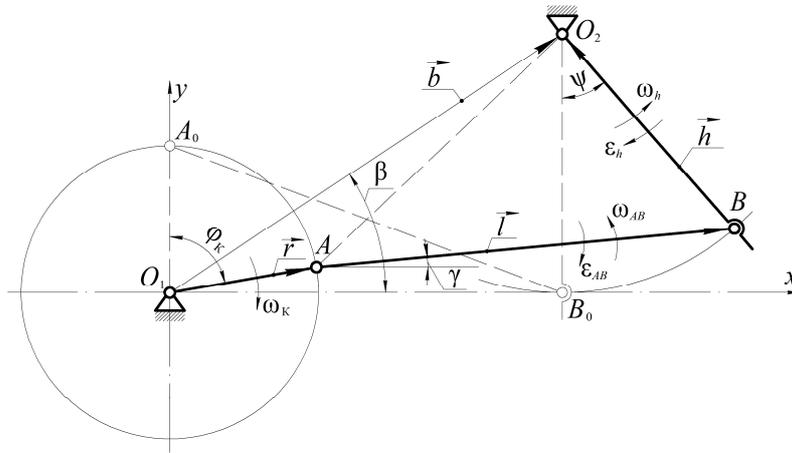


Рисунок 3. – Вектарны контур для кінематычнай схемы ланцюжнага агрегата з чатырохстрижневою моделлю робочої камеры

Выделім з рысунка прывадны механізм O_1ABO_2 з пабудаваным для яго замкнёным вектарным контурам (рысунак 4) і падрабязна разгледзім тры варыянты рэалізацыі метада.



Рысунак 4. – Схема прываднага механізма для вызначэння кінематычных характарыстык руху звенняў метадам замкнёных вектарных контураў

У адвольным становішчы механізма $\vec{r} + \vec{l} + \vec{h} = \vec{b}$. Вектарнай роўнасці адпавядае наступная аналітычная сістэма ўраўненняў:

$$\left. \begin{aligned} r \sin \varphi_k + l \cos \gamma - h \sin \psi &= b \cos \beta \\ r \cos \varphi_k + l \sin \gamma + h \cos \psi &= b \sin \beta \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

дзе φ_k – вугал павароту крывашыпа адносна пачатковага становішча O_1A_0 ; γ – вугал павароту шатуна адносна нерухомай восі O_1x ; ψ – вуглавое перамяшчэнне каромысла адносна яго пачатковага становішча.

Пастаянны вугал β вызначаецца па формуле $\beta = \arctg(O_2B_0/O_1B_0)$. Невядомымі застаюцца пераменныя вуглы γ і ψ .

Вызначым вугал ψ . Для гэтага выключаем з сістэмы ўраўненняў (1) вугал γ . Перапісваем (1) у выглядзе:

$$\left. \begin{aligned} (l \cos \gamma)^2 &= a_x^2 + (h \sin \psi)^2 \\ (l \sin \gamma)^2 &= a_y^2 - (h \cos \psi)^2 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

дзе $a_x = b \cos \beta - r \sin \varphi_k$; $a_y = b \sin \beta - r \cos \varphi_k$.

Складваем роўнасці (2):

$$(a_x + h \sin \psi)^2 + (a_y - h \cos \psi)^2 = l^2.$$

Для вызначэння вугла ψ выконваем належныя матэматычныя пераўтварэнні; атрымліваем ўраўненне, з якога знойдем патрэбны вугал:

$$(a_x^2 + a_y^2) \sin^2 \psi - 2P_1 a_x \sin \psi + P_1^2 - a_y^2 = 0, \quad (3)$$

дзе $P_1 = [l^2 - h^2 - (a_x^2 + a_y^2)] / 2h$.

Рашэнне ўраўнення (3) дае наступныя вынікі:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= \arcsin \left[\left(a_y \sqrt{a_x^2 + a_y^2 - P_1^2} + a_x P_1 \right) / a_x^2 + a_y^2 \right]; \\ \psi_2 &= -\arcsin \left[\left(a_y \sqrt{a_x^2 + a_y^2 - P_1^2} - a_x P_1 \right) / a_x^2 + a_y^2 \right]; \\ \psi_3 &= \pi + \arcsin \left[\left(a_y \sqrt{a_x^2 + a_y^2 - P_1^2} - a_x P_1 \right) / a_x^2 + a_y^2 \right]; \\ \psi_4 &= \pi - \arcsin \left[\left(a_y \sqrt{a_x^2 + a_y^2 - P_1^2} + a_x P_1 \right) / a_x^2 + a_y^2 \right]. \end{aligned}$$

З гэтых каранёў выбіраем сапраўдны. Яго выраз дыферэнцыруем па часе; атрымліваем вуглавую скорасць каромысла $\omega_h = d\psi/dt$. Паўторнае знаходжанне вытворнай па часе ўяўляе вуглавае паскарэнне каромысла $\varepsilon_h = d\omega_h/dt$. Разгорнутыя формулы для вылічэння ω_h , ε_h атрымаюцца вельмі вялізнымі. Таму рашэнне мэтазгодна рэалізуюцца з дапамогай адпаведных камп'ютэрных праграм, напрыклад, Mathcad.

Для вызначэння вугла γ выключаем з сістэмы (1) вугал ψ . Паводле папярэдняга алгарытму маем:

$$\left. \begin{aligned} (h \sin \psi)^2 &= b_x^2 + (l \cos \gamma)^2 \\ (h \cos \psi)^2 &= b_y^2 - (l \sin \gamma)^2 \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

дзе $b_x = r \sin \varphi_k - b \cos \beta$; $b_y = b \sin \beta - r \cos \varphi_k$.

Складваем роўнасці (4):

$$(b_x + l \cos \gamma)^2 + (b_y - l \sin \gamma)^2 = h^2.$$

Адсюль

$$(b_x^2 + b_y^2) \sin^2 \gamma + 2P_2 b_y \sin \gamma + P_2^2 - b_x^2 = 0; \quad (5)$$

$$P_2 = [h^2 - l^2 - (b_x^2 + b_y^2)] / 2l.$$

Знаходзім патрэбны вугал:

$$\gamma_1 = \arcsin \left[(b_x \sqrt{b_x^2 + b_y^2 - P_2^2} - b_y P_2) / b_x^2 + b_y^2 \right];$$

$$\gamma_2 = -\arcsin \left[(b_x \sqrt{b_x^2 + b_y^2 - P_2^2} + b_y P_2) / b_x^2 + b_y^2 \right];$$

$$\gamma_3 = \pi + \arcsin \left[(b_x \sqrt{b_x^2 + b_y^2 - P_2^2} + b_y P_2) / b_x^2 + b_y^2 \right];$$

$$\gamma_4 = \pi - \arcsin \left[(b_x \sqrt{b_x^2 + b_y^2 - P_2^2} - b_y P_2) / b_x^2 + b_y^2 \right].$$

Для знаходжання вуглавой скорасці ω_{AB} і вуглавога паскарэння ε_{AB} шатуна выконваюцца тыя ж матэматычныя дзеянні, што і для вызначэння кінематычных характарыстык каромысла.

Магчыма іншая рэалізацыя метада замкнёных вектараных контураў. З ураўненняў (3), (5) вызначаем функцыі $\sin \psi$, $\sin \gamma$ і $\cos \psi = \sqrt{1 - \sin^2 \psi}$, $\cos \gamma = \sqrt{1 - \sin^2 \gamma}$. Затым дыферэнцыруем сістэму (1) па часе t ; улічваем, што $d(r \sin \varphi_k)/dt = r \cos \varphi_k d\varphi_k/dt = r \cos \varphi_k \omega_k$; $d(r \cos \varphi_k)/dt = -r \sin \varphi_k d\varphi_k/dt = -r \sin \varphi_k \omega_k$; $d(l \sin \gamma)/dt = l \cos \gamma d\gamma/dt = l \cos \gamma \omega_{AB}$; $d(l \cos \gamma)/dt = -l \sin \gamma d\gamma/dt = -l \sin \gamma \omega_{AB}$; $d(h \sin \psi)/dt = h \cos \psi d\psi/dt = h \cos \psi \omega_h$; $d(h \cos \psi)/dt = -h \sin \psi d\psi/dt = -h \sin \psi \omega_h$; $d(b \sin \beta)/dt = 0$.

Атрымліваем:

$$\left. \begin{aligned} r \cos \varphi_k \omega_k - l \sin \gamma \omega_{AB} - h \cos \psi \omega_h &= 0 \\ -r \sin \varphi_k \omega_k + l \cos \gamma \omega_{AB} - h \sin \psi \omega_h &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

Перапісваем сістэму (6) у выглядзе:

$$\left. \begin{aligned} l \sin \gamma \omega_{AB} + h \cos \psi \omega_h &= r \cos \varphi_k \omega_k \\ l \cos \gamma \omega_{AB} - h \sin \psi \omega_h &= r \sin \varphi_k \omega_k \end{aligned} \right\}. \quad (7)$$

Тут невядомымі з'яўляюцца скорасці ω_{AB} , ω_h . Вызначаем іх па формулах Крамера:

$$\omega_{AB} = \Delta_1 / \Delta; \quad \omega_h = \Delta_2 / \Delta,$$

$$\text{дзе } \Delta_1 = \begin{vmatrix} r \cos \varphi_k \omega_k & h \cos \psi \\ r \sin \varphi_k \omega_k & -h \sin \psi \end{vmatrix} = -rh \sin(\varphi_k + \psi) \omega_k; \quad \Delta_2 = \begin{vmatrix} l \sin \gamma & r \cos \varphi_k \omega_k \\ l \cos \gamma & r \sin \varphi_k \omega_k \end{vmatrix} = -lr \cos(\varphi_k + \gamma) \omega_k;$$

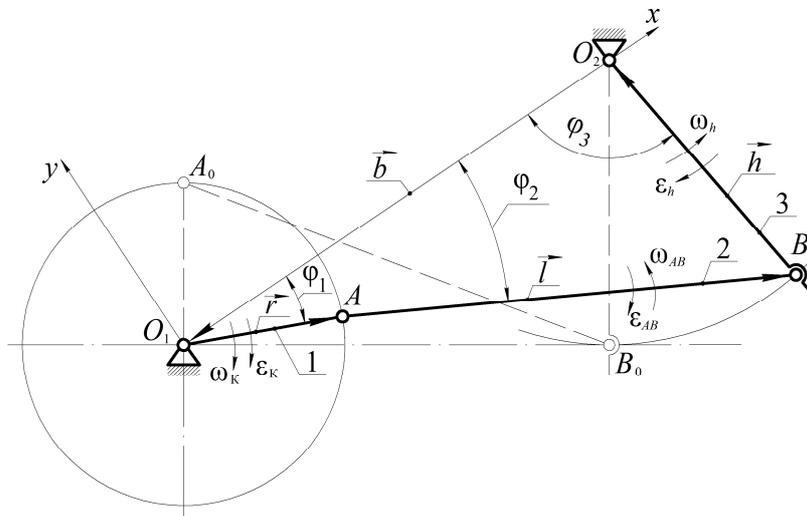
$$\Delta = \begin{vmatrix} l \sin \gamma & h \cos \psi \\ l \cos \gamma & -h \sin \psi \end{vmatrix} = -lh \cos(\psi - \gamma).$$

Канчаткова:

$$\omega_{AB} = \frac{r \sin(\varphi_k + \psi)}{l \cos(\psi - \gamma)} \omega_k; \quad \omega_h = \frac{r \cos(\varphi_k + \gamma)}{h \cos(\psi - \gamma)} \omega_k. \quad (8)$$

Вуглавья паскарэнні ε_{AB} і ε_h вызначаюцца непасрэдным дыферэнцыраваннем формул (8), альбо дыферэнцыраваннем сістэмы (7) і наступным рашэннем атрыманай новай сістэмы з невядомымі ε_{AB} , ε_h .

Разгледзім трэці варыянт для вызначэння кінематычных характарыстык метадам замкнёных вектарных контураў. Вось O_1x накіроўваем уздоўж стойкі O_1O_2 , а вось O_1y – перпендыкулярна да яе (рысунак 5).



Рысунак 5. – Схема прываднага механізма для вызначэння кінематычных характарыстык руху звенняў метадам замкнёных вектарных контураў

Звенні механізма дадаткова абазначым лічбамі: 1 – крывашып; 2 – шатуна; 3 – каромысел. Вуглы павароту крывашыпа, шатуна і каромысла адносна стойкі абазначым адпаведна праз φ_1 , φ_2 , φ_3 .

Разгледзім замкнёны контур O_1ABO_2 і запішам вектарнае ўраўненне:

$$\vec{r} + \vec{l} + \vec{h} + \vec{b} = 0. \quad (9)$$

Спрацыруем роўнасць (9) на восі каардынат:

$$r \cos \varphi_1 + l \cos \varphi_2 + h \cos \varphi_3 - b = 0. \quad (10)$$

$$-r \sin \varphi_1 - l \sin \varphi_2 + h \sin \varphi_3 = 0. \quad (11)$$

Ураўненні (10), (11) з'яўляюцца трансцэндэнтнымі. Іх рашэнне патрабуе ўстанаўлення межаў шукаемых велічынь. У дачыненні да разгледжанай задачы гэта магчыма, выкарыстаўшы графічны спосаб пабудовы механізма; самі невядомыя велічыні φ_2 , φ_3 вызначаюцца шляхам рашэння ураўненняў (10), (11) метадам паслядоўных набліжэнняў.

Паводле больш дасканалага варыянта метаду замкнёнага вектарнага контура перад вызначэннем вуглавых скорасцей знаходзяцца перадатачныя функцыі [4]:

$$u_{21} = d\varphi_2/d\varphi_1 = \omega_{AB}/\omega_k; \quad u_{31} = d\varphi_3/d\varphi_1 = \omega_h/\omega_k,$$

дзе ω_k , ω_{AB} , ω_h – вуглавья скорасці адпаведна крывашыпа, шатуна і каромысла.

Прадыферэнцыруем ураўненні (10), (11) па φ_1 ; атрымаем:

$$-r \sin \varphi_1 - l \sin \varphi_2 u_{21} - h \sin \varphi_3 u_{31} = 0; \quad (12)$$

$$-r \cos \varphi_1 - l \cos \varphi_2 u_{21} + h \cos \varphi_3 u_{31} = 0. \quad (13)$$

Для вызначэння перадатачнай функцыі u_{31} ураўненне (12) памнажаем на $\cos \varphi_2$, ураўненне (13) на $(-\sin \varphi_2)$, адкуль знаходзім:

$$u_{31} = [-r \sin(\varphi_1 - \varphi_2)]/h \sin(\varphi_2 + \varphi_3).$$

Визначим u_{21} . Памнажаем ураўненне (12) на $\cos \varphi_3$, ураўненне (13) на $\sin \varphi_3$, складваем вынікі. Канчаткова атрымліваем:

$$u_{21} = [r \sin(\varphi_1 + \varphi_3)] / l \sin(\varphi_2 + \varphi_3).$$

Вуглавая скорасць шатуна ω_{AB} і каромысла ω_h вызначаецца па формулах:

$$\omega_{AB} = u_{21} \omega_k; \quad \omega_h = u_{31} \omega_k. \tag{14}$$

Вуглавая паскарэнні звенняў знаходзяцца дыферэнцыяваннем суадносін (14) па часе:

$$\varepsilon_{AB} = u'_{21} \omega_k^2 + u_{21} \varepsilon_k, \tag{15}$$

$$\varepsilon_h = u'_{31} \omega_k^2 + u_{31} \varepsilon_k, \tag{16}$$

дзе ε_k – вуглавое паскарэнне кривашыпа; u'_{21} , u'_{31} – вытворныя передаточных функцый:

$$u'_{21} = \frac{r}{l} \left[\frac{\cos(\varphi_1 + \varphi_3)(1 + u_{31})}{\sin(\varphi_2 + \varphi_3)} + \frac{\sin(\varphi_1 + \varphi_3) \cos(\varphi_2 + \varphi_3)(u_{21} - u_{31})}{\sin^2(\varphi_2 + \varphi_3)} \right].$$

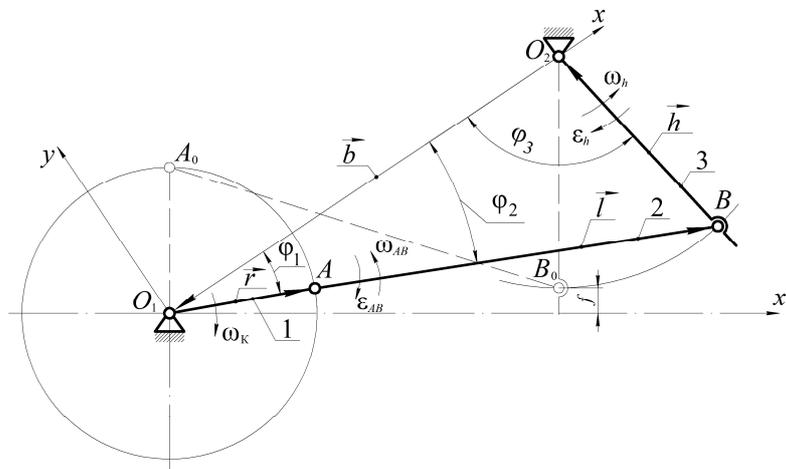
$$u'_{31} = \frac{-r}{h} \left[\frac{\cos(\varphi_1 - \varphi_2)(1 + u_{21})}{\sin(\varphi_3 + \varphi_2)} - \frac{\sin(\varphi_1 - \varphi_2) \cos(\varphi_3 + \varphi_2)(u_{31} - u_{21})}{\sin^2(\varphi_3 + \varphi_2)} \right].$$

Пры пастаяннай вуглавой скорасці кривашыпа ω_k вуглавое паскарэнне $\varepsilon_k = 0$; тады з формул (15) і (16) выключаем адпаведныя складнікі.

Разгледзім прыклад прымянення метада замкнёнага вектарнага контура для вызначэння кінематычных характарыстык прываднога механізма на падставе рашэння трансцэндэнтных ураўненняў.

Раней намі зроблен аналіз уплыву геаметрычных суданосін звенняў механізма $\rho = r/l$ і $\lambda = h/l$ на адносныя кінематычныя характарыстыкі: $\omega_{AB}^{\xi} = \omega_{AB} / \omega_k$; $\omega_h^{\xi} = \omega_h / \omega_k$; $\varepsilon_{AB}^{\xi} = \varepsilon_{AB} / \omega_k^2$; $\varepsilon_h^{\xi} = \varepsilon_h / \omega_k^2$. Такое даследаванне зроблена ў дачыненні да прыватнай схемы прываднога механізма, якая паказана на рысунку 4. У ёй пачатак восяў каардынат сумешчаны з восяю вярчэння кривашыпа O_1 , а вошь O_1x накіравана па датычнай да траекторыі, што апісваецца цэнтрам кінематычнай пары B . Умова пачатковага становішча механізма: пры $\varphi_k = 0^\circ$ вугал $\psi = 0^\circ$.

У дадатак да прынятых раней вар'іруемых даўжынь звенняў механізма (іх суадносін) увядзем яшчэ адзін – змяненне даўжыні каромысла h з захаваннем умовы пачатковага становішча механізма (рысунак 6).



Рысунак 6. – Схема прываднога механізма для ўліку змянення даўжыні каромысла h

Для аналізу ўплыву змянення даўжыні каромысла h на кінематычныя характарыстыкі ўвядзем безразмерны параметр:

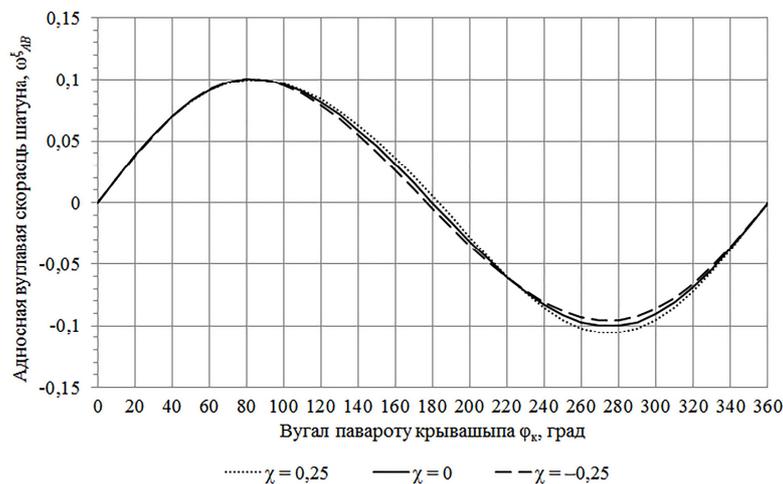
$$\chi = \pm f/h,$$

дзе f – адлегласць ад восі O_1x' да пункта B_0 (рысунак 6). Дадатнае значэнне f прымаецца, калі траекторыя руху кінематычнай пары В вышэй восі O_1x' , у супрацьлеглым выпадку – адмоўнае. Пры $\chi = 0$ пункт B_0 знаходзіцца на восі O_1x' .

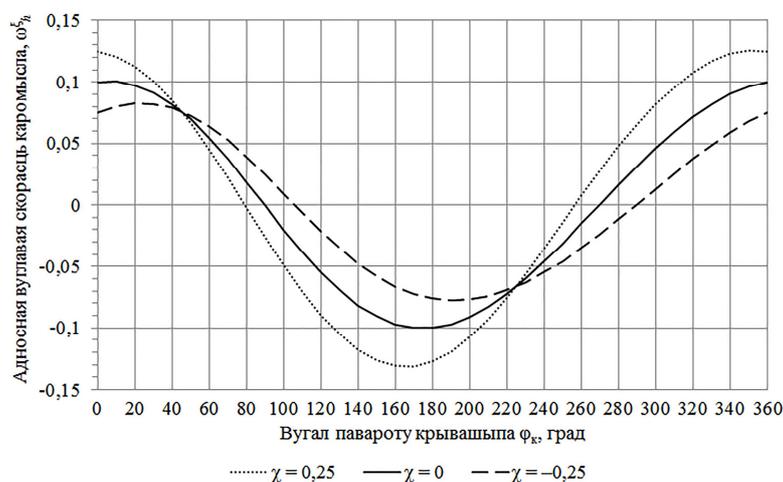
Пры змяненні даўжыні каромысла h для захавання ўмовы пачатковага становішча механізма (пры $\varphi_k = 0^\circ$ вугал $\psi = 0^\circ$) трэба змяняць і даўжыню шатуна l . Такія дзеянні прыводзяць да адначасовага змянення трох безразмерных параметраў: ρ , λ і χ . Адзначым, што існуе такі размер h каромысла, пры якім даўжыня шатуна l і, адпаведна, безразмерны параметр ρ застаюцца без змяненняў.

За базавы варыянт прыяем механізм з наступнымі геаметрычнымі суадносінамі: $\chi = 0$; $\lambda = 1$; $\rho = 0,1$. Будзем змяняць даўжыню каромысла h і, у адпаведнасці з гэтым, даўжыню шатуна l ; прыяем два варыянты геаметрычных суадносін – $\chi = 0,25$; $\lambda = 0,8$; $\rho = 0,1$ і $\chi = -0,25$; $\lambda = 1,228$; $\rho = 0,092$.

На рысунках 7–10 прадстаўлены графікі змянення адносных вуглавых скорасцей і паскарэнняў звенняў прываднога механізма пры розных геаметрычных суадносінах звенняў у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k .



Рысунак 7. – Графік змянення адноснай вуглавой скорасці шатуна ω_{AB}^{ξ} у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k



Рысунак 8. – Графік змянення адноснай вуглавой скорасці каромысла ω_h^{ξ} у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа φ_k

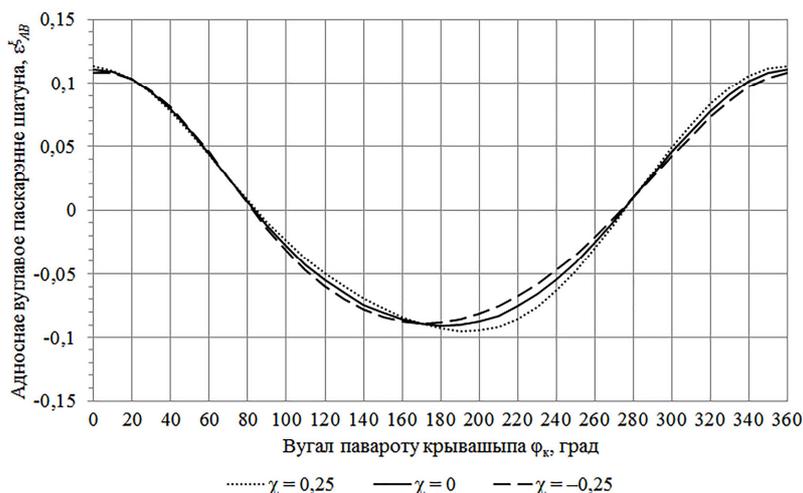


Рисунок 9. – График змянення адноснага вуглавога паскарэння шатуна ϵ_{AB}^{ξ} у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа ϕ_k

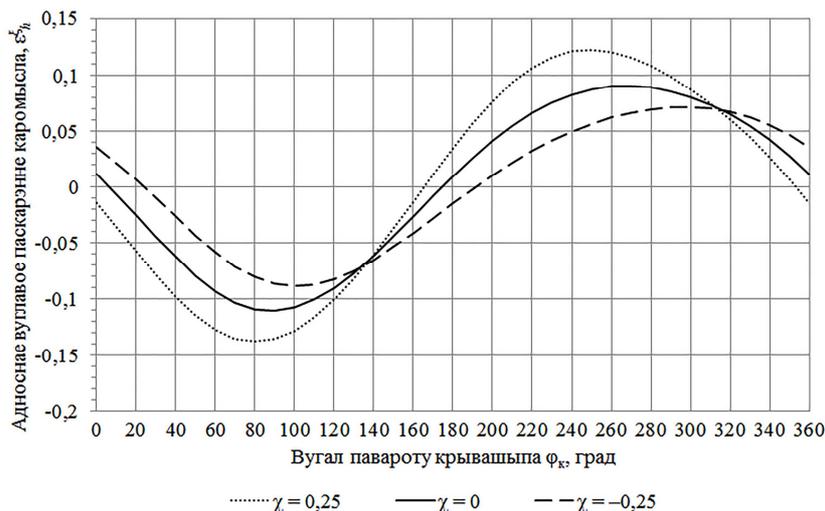


Рисунок 10. – График змянення адноснага вуглавога паскарэння каромысла ϵ_h^{ξ} у залежнасці ад вугла павароту крывашыпа ϕ_k

Як відаць, змяненне даўжыні h практычна не ўплывае на велічыню адносных кінематычных характарыстык ω_{AB}^{ξ} , ϵ_{AB}^{ξ} і адчувальна на велічынях ω_h^{ξ} , ϵ_h^{ξ} ; пры гэтым памяншэнне параметра h вядзе да павелічэння апошніх характарыстык.

Метад замкнёных вектарных контураў можа быць рэалізаваны з выкарыстаннем комплексных лічбаў [6; 7].

Для вызначэння кінематычных характарыстык прасторавых механізмаў распрацаваны метады пераўтварэння каардынат [3; 5], які таксама можа быць выкарыстаны для даследавання плоскіх механізмаў. Яго сутнасць падрабязна апісана ў навучальным дапаможніку [5].

У літаратурных крыніцах выкладзены блізкія па зместу метады з рознымі назвамі: метады трохвугольнікаў [7], метады групы Асура [8], метады базіснага вектара [9].

У працэсе кінематычнага аналізу чатырохзвенніка хтосьці з даследчыкаў звярнуў увагу на наяўнасць у яго кінематычнай схеме (рысунак 4) трохвугольніка ABO_2 . Іншыя палічылі дамінуючымі базісны вектар $\vec{O_2A}$ (на рысунку 4 паказаны як адрэзак), альбо групу Асура (дыяду) ABO_2 . Так узніклі прыведзеныя вышэй назвы метадаў.

Заклучэнне. У аўтарскім артыкуле апісана канструкцыя эксперыментальнага абразца ланцужнага агрэгата і прадстаўлена яго кінематычная схема з чатырохстрыжнявой мадэллю рабочей камеры. Яе прывадны механізм уяўляе сабою крывашыпна-каромыславы чатырохзвеннік. Ад руху апошняга ў значнай ступені

залежаць дынамічныя характарыстыкі рабочай камеры і ўласцівасці ўсяго агрэгата. У пошуках рацыянальнага алгарытму кінематычнага даследавання прываднага механізма прааналізаваны літаратурныя крыніцы. У выніку ў поле зроку даследчыкаў трапілі алгебраічны метады, разнастайнасці метадаў замкнёнага вектарнага контура, метады пераўтварэння каардынат ды іншыя. У нашым артыкуле падрабязна выкладзены розныя варыянты рэалізацыі метадаў замкнёнага вектарнага контура, а адзін з іх выкарыстаны ў пошуках аптымальнай структуры прываднага механізма; па выніках пабудаваны графікі.

Вынікі даследавання будуць запатрабаваны для ўдасканалення канструкцыі ланцужага агрэгата і стварэння іншых новых аб'ектаў тэхнікі.

ЛІТАРАТУРА

1. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – 4-е изд. – М.: Наука, 1988. – 640 с.
2. Баранов Г.Г. Курс теории механизмов и машин: учеб. пособие. – 5-е изд., стереотип. – М.: Машиностроение, 1975. – 494 с.
3. Курсовое проектирование по теории механизмов и машин / В.К. Акулич, П.П. Анципорович, Э.И. Астахов и др.; под общ. ред. Г.Н. Девойно. – Минск: Выш. шк., 1986. – 286 с.
4. Вихренко В.С., Грода Я.Г. Кинематика составного и плоскопараллельного движений: учеб. пособие. – Минск: БГТУ, 2005. – 82 с.
5. Борисенко Л.А. Теория механизмов, машин и манипуляторов: учеб. пособие. – Минск: Новое знание; М.: ИНФРА-М, 2011. – 285 с.
6. Uicker J.J., Pennock G.R., Shigley J.E. Theory of machines and mechanisms. – 5th ed. – New York: Oxford University Press, 2016. – 976 p.
7. Озол О.Г. Теория механизмов и машин: [пер. с латыш.] / под ред. С.Н. Кожевникова; – М.: Наука, 1984. – 432 с.
8. Zhonghe Ye, Zhaohui Lan, Smtith M.R. Mechanisms and Machine Theory. – Beijing: Higher Education Press, 2001. – 255 p.
9. Кроль Д.Г., Иноземцева Н.В., Лискович М.И. Кинематический анализ плоских рычажных механизмов: практикум по курсу «Теория механизмов и машин». – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012. – 55 с.

REFERENCES

1. Artobolevskiy, I.I. (1988). *Teoriya mekhanizmov i mashin*. Moscow: Nauka. (In Russ.).
2. Baranov, G.G. (1975). *Kurs teorii mekhanizmov i mashin: uchebnoe posobie*. Moscow: Mashinostroenie. (In Russ.).
3. Akulich, V.K., Antsiporovich, P.P., Astakhov, E.I., Vstavskiy, E.A., Devoyno, G.N., Zinkevich, V.I. ... Tsitovich, O.N. (1986). *Kursovoe proektirovanie po teorii mekhanizmov i mashin*. Minsk: Vyshehishaya shkola. (In Russ.).
4. Vikhrenko, V.S. & Groda, Ya.G. (2005). *Kinematika sostavnogo i ploskoparallel'nogo dvizheniy: uchebnoe posobie*. Minsk: BGTU. (In Russ.).
5. Borisenko, L.A. (2011). *Teoriya mekhanizmov, mashin i manipulyatorov: uchebnoe posobie*. Minsk: Novoe znanie. Moscow: INFRA-M. (In Russ.).
6. Uicker, J.J., Pennock, G.R. & Shigley, J.E. (2016). *Theory of machines and mechanisms*. New York: Oxford University Press.
7. Ozol, O.G. (1984). *Teoriya mekhanizmov i mashin: [per. s latysh.]*. Moscow: Nauka. (In Russ.).
8. Zhonghe, Ye., Zhaohui, Lan. & Smtith, M.R. (2001). *Mechanisms and Machine Theory*. Beijing: Higher Education Press.
9. Krol', D.G., Inozemtseva, N.V. & Liskovich, M.I. (2012). *Kinematicheskiy analiz ploskikh rychazhnykh mekhanizmov: praktikum po kursu «Teoriya mekhanizmov i mashin»*. Gomel': GGTU im. P.O. Sukhogo. (In Russ.).

Паступіў 11.01.2025

ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ КИНЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРИВОДНОГО МЕХАНИЗМА ЦЕПНОГО АГРЕГАТА

В.А. ПОТАПОВ, канд. техн. наук, доц. **С.И. РУСАН**, **Е.С. СИДОР**
(Барановичский государственный университет)
д-р техн. наук, проф. Л.А. СИВАЧЕНКО
(Белорусско-Российский университет, Могилев)

Аўтарамі статьи працягваецца пошук аптымальнага функцыянавання створанага імі эксперыментальнага абразца цепнога агрэгата. Асноўнымі часткамі яго канструкцыі з'яўляюцца рабочая камера і яе прыводнага механізм. Двiжжэнне цепей рабочай камеры, а значыць, і дынамічнае ўздзеянне на матэрыял, якіму падлежыць перапрацоўцы, залежыць ад кінематычных характарыстык двiжжэння звеньев прыводнага механізма, прычым пераважна – крывозішпа і коромысла. Прычым актуальнай з'яўляецца задача выбару алгарытму кінематычнага аналізу прыводнага механізма. У даследаванні прадставлены вынікі агляду атчественных і замежных крыніц, у якіх падрабязна апісаны алгебраічны метад, метад замкнёнага вектарнага контура і пераўтварэння каардынат. Першы з іх асноваў на алгарытме тэарэтычнай механікі – вначале з геаметрычнага аналізу схем записваюцца ўраўненні двiжжэння звеньев механізма,

а затем определяются их скорости и ускорения как первая и вторая производная по времени. Согласно второму методу уравнения движения механизма составляются с использованием замкнутого векторного контура через его проекции на оси координат. Для кинематического анализа рассмотренного механизма также могут применяться методы преобразования координат, треугольника, группы Ассур и базового вектора.

Ключевые слова: цепной агрегат, приводной механизм, кривошипно-коромысловый механизм, аналитические методы, кинематические характеристики.

REVIEW OF ANALYTICAL METHODS OF KINEMATIC ANALYSIS OF THE DRIVE MECHANISM OF A CHAIN UNIT

V. POTAPOV, S. RUSAN, E. SIDOR
(Baranavichy State University)

L. SIVACHENKO
(Belarusian-Russian University, Mogilev)

The authors of the article continue searching for the optimal operation of the experimental model of the chain unit they created. The main parts of its design are the working chamber and its drive mechanism. The movement of the chains of the working chamber, and therefore the dynamic impact on the material to be processed, depends on the kinematic characteristics of the movement of the drive mechanism links, primarily the crank and rocker. Therefore, the problem of choosing an algorithm for kinematic analysis of the drive mechanism is relevant. The study presents the results of a review of domestic and foreign sources, which describe in detail the algebraic method, closed vector contour methods and coordinate transformations. The first of them is based on the algorithm of theoretical mechanics - first, the equations of motion of the mechanism links are written from the geometric analysis of the scheme, and then their speeds and accelerations are determined as the first and second derivatives with respect to time. According to the second method, the equations of motion of the mechanism are composed using a closed vector contour through its projections on the coordinate axes. For the kinematic analysis of the mechanism under consideration, the methods of coordinate transformation, triangle, Assur group and base vector can also be used.

Keywords: chain unit, drive mechanism, crank-rocker mechanism, analytical methods, kinematic characteristics.

ТРАНСПОРТ

УДК [331.101.1:656.13]+004.8

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-18-25

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ ОШИБОК
В ЗАДАЧАХ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ
ДЛЯ ИНТЕГРАЦИИ В ПРЕДИКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ***канд. техн. наук, доц. С.В. БОГДАНОВИЧ**(Белорусский национальный технический университет, Минск)**канд. техн. наук, доц. П.И. БАЛТРУКОВИЧ**(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

Рассмотрены современные методы моделирования человеческих ошибок операторов центров управления дорожным движением с целью их последующей интеграции в предиктивные системы безопасности транспортной инфраструктуры. Разработана комплексная трехуровневая аналитическая модель, органично сочетающая качественные и количественные методы оценки, включая детализированные PSF-профили, которые дают возможность оценивать влияние ключевых факторов: степени усталости оператора, уровня когнитивной нагрузки, эргономики рабочих мест и качества визуальных интерфейсов, на вероятность возникновения ошибок оператора. Особое внимание уделено междисциплинарному подходу, объединяющему методы транспортного планирования, когнитивной психологии, искусственного интеллекта и эргономики. Предложены практические механизмы интеграции модели в интеллектуальные транспортные системы. Среди них динамическая корректировка прогнозных алгоритмов с учетом реальных значений вероятности ошибок оператора и автоматизация превентивных управляющих воздействий. Проведенные исследования демонстрируют, что систематический учет человеческого фактора позволяет существенно повысить точность и надежность предиктивных систем безопасности, снижая количество ДТП.

Ключевые слова: человеческий фактор, PSF-профили, предиктивные системы, безопасность дорожного движения, вероятность ошибки оператора, интеллектуальные транспортные системы, когнитивная эргономика, искусственный интеллект.

Введение. Несмотря на предпринимаемые меры по повышению безопасности дорожного движения, количество ДТП остается на высоком уровне [1–3]. Ежегодно в мире погибают почти 1,2 млн человек и 50 млн получают травмы. По оценкам, дорожно-транспортный травматизм является восьмой причиной смерти во всем мире и основной причиной смерти детей и молодых людей в возрасте от 15 до 29 лет, что в значительной степени затрагивает людей, вступающих в наиболее продуктивный возраст¹. Эта статистика подчеркивает настоятельную необходимость разработки новых комплексных подходов к повышению безопасности дорожного движения, объединяющих достижения транспортного планирования, когнитивной психологии, искусственного интеллекта (ИИ) и эргономики. Развертывание и использование интеллектуальных транспортных систем (ИТС) демонстрирует значительный потенциал в улучшении управления дорожным движением и повышении его безопасности [4]. Исследования показывают [5], что в населенных пунктах с камерами фиксации нарушений число погибших или получивших тяжелые травмы в ДТП ниже на 31–67%. Применение знаков, информирующих водителей о дорожной обстановке, привело к снижению числа ДТП с травмами в Великобритании на 28%, всех типов ДТП в Швейцарии на 35% и ДТП с материальным ущербом и травмами в Германии на 10–30%. При анализе результатов реализации федерального проекта Российской Федерации «Безопасные качественные дороги» установлено, что в Самарской области, благодаря в т.ч. и ИТС, удалось повысить безопасность дорожного движения. В 2024 г. по сравнению с 2020-м количество ДТП на дорогах агломерации сократилось на 9%, количество погибших снизилось на 19%, а пострадавших – на 9%².

Однако, несмотря на возрастающую автоматизацию процессов мониторинга и управления дорожной инфраструктурой, человеческий фактор продолжает играть ключевую роль, особенно в критических ситуациях, требующих оперативного принятия решений [6; 7].

¹ Road Safety Performance Review – Uzbekistan [Electronic resource] / The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). – 2024. – <https://unece.org/info/publications/pub/391336> (дата обращения: 28.04.2025).

² Федеральный проект Российской Федерации «Безопасные качественные дороги». Развитие ИТС: 25 городских агломераций достигли первого уровня зрелости интеллектуальной транспортной системы [Электронный ресурс]. – 2025. – URL: <https://bkdrf.ru/news/read/razvitie-its-25-gorodskih-aglomeratsiy-dostigli-pervogo-urovnya-zrelosti-intellektualnoy-transportnoy-sistemy> (дата обращения: 02.05.2025).

В других высокорисковых отраслях, например, атомной энергетике, уже широко применяются методы анализа надежности человека (Human Reliability Analysis, HRA) [8] и вероятностного анализа безопасности (PSA) [9]. Данные методы позволяют системно и количественно оценивать влияние человеческого фактора на безопасность эксплуатации АЭС, выявлять критические сценарии и разрабатывать меры по снижению риска ошибок персонала, применяемых в атомной энергетике. Использование же адаптированных моделей, описывающих ошибки операторов центров управления дорожным движением (ЦУДД) с учетом специфики их задач и рабочих условий в сфере мониторинга и управления дорожной инфраструктурой, остается ограниченным.

Целью данной работы является разработка комплексной модели человеческих ошибок операторов ЦУДД, которая объединит качественные и количественные методы анализа с учетом достижений в области ИИ и когнитивных наук. Предлагаемый подход предусматривает не только создание теоретической модели, но и разработку практических механизмов ее интеграции в предиктивные системы безопасности дорожного движения, что даст возможность существенно снизить аварийность на транспорте за счет более точного учета человеческого фактора в процессах управления дорожной инфраструктурой.

Основная часть. Деятельность оператора ЦУДД представляет собой сложный многокомпонентный процесс, требующий постоянного взаимодействия с техническими системами, анализа поступающей информации и оперативного принятия решений. В этой связи для количественной оценки ошибок операторов находят применение методы HRA, среди которых наиболее распространены:

- THERP (Technique for Human Error Rate Prediction) – использует базы данных частот ошибок для типовых операций [10];
- HEART (Human Error Assessment and Reduction Technique) – учитывает влияние «факторов формирования производительности» (Performance Shaping Factors, PSFs), таких, например, как стресс или качество обучения [11];
- SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis) – упрощенный метод, оценивающий вероятность ошибки на основе 8 PSFs [12];
- CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method) – фокусируется на когнитивных механизмах ошибок, включая прогнозирование их последствий [8].

Эти методы, однако, требуют адаптации к задачам операторов ЦУДД, где определяющими PSFs могут быть:

- когнитивная нагрузка (число одновременно отслеживаемых событий);
- качество интерфейсов (удобство визуализации данных);
- временные ограничения (скорость реакции на инциденты).

В связи с изложенным с целью адаптации указанных методов к условиям работы ИТС разработана модель человеческих ошибок оператора ЦУДД, которая представляет собой трехуровневую систему, интегрирующую качественные и количественные методы анализа (рисунок).

Основные компоненты модели включают:

1. Базу знаний об ошибках – структурированный каталог типовых ошибок оператора с привязкой к конкретным задачам (мониторинг, управление), условиям выполнения (дневное / ночное время, нагрузка) и последствиям для безопасности.

2. PSF-профили – структурированные наборы параметров, которые количественно описывают факторы, влияющие на работоспособность и эффективность оператора в сложных системах.

Структура PSF-профиля складывается из следующих факторов:

- а) индивидуальные факторы:
 - уровень подготовки – оценивается по шкале от 0,7 (новичок) до 1,3 (высококвалифицированный специалист);
 - физическое состояние – включает показатели усталости (от 1,0 (начало смены) до 3,0 (конец ночной смены)) и стресса;
 - когнитивные способности – учитывает скорость реакции и объем внимания;
- б) факторы рабочей среды:
 - эргономика рабочего места – коэффициент от 0,8 (плохие условия) до 1,2 (оптимальная организация);
 - качество визуальной информации – зависит от разрешения видео, компоновки мониторов (0,7–1,3);
 - уровень шума и освещенности – нормализованный показатель условий труда.
3. Организационные факторы:
 - наличие регламентов – степень регламентированности процедур (0,9–1,1);
 - система подсказок – коэффициент поддержки принятия решений;
 - режим работы – учитывает график сменности и перерывы.
4. Факторы задачи:
 - сложность ситуации – показатель неоднозначности условий (1,0–2,5);
 - временные ограничения – коэффициент срочности реагирования;
 - частота возникновения – учет типичности/уникальности ситуации.

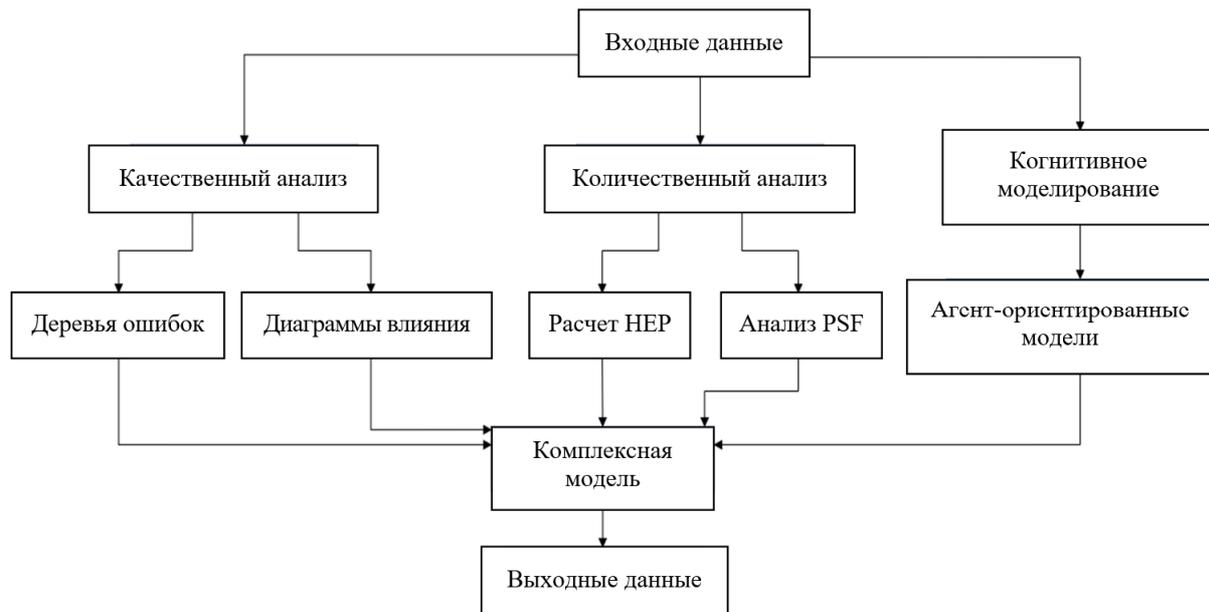


Рисунок. – Модель человеческих ошибок оператора ЦУДД

Каждый фактор в профиле имеет:

- базовое значение (1,0) – нейтральное влияние;
- диапазон модификации (обычно 0,5–3,0) – степень усиления/ослабления эффекта;
- весовой коэффициент – значимость фактора для конкретного типа задач.

Для расчета комплексного влияния можно применить модифицированную версию метода SPAR-H (Standardized Plant Analysis Risk-Human Reliability Analysis), используемую для расчета вероятности ошибки оператора (Human Error Probability, HEP) с учетом влияния различных факторов среды и состояния человека:

$$HEP = BHEP \times (PSF_{fatigue} \times PSF_{workload} \times PSF_{interface} \times \dots \times PSF_n),$$

где BHEP (Basic Human Error Probability) – базовая вероятность ошибки (без учета внешних факторов); PSF_{fatigue} – усталость; PSF_{workload} – нагрузка; PSF_{interface} – качество интерфейса; PSF_n – n-параметр.

Рассмотрим применение модели для конкретной задачи: «Своевременное обнаружение ДТП по видеопотоку в условиях ограниченной видимости». Результаты расчета вероятности ошибки оператора с учетом выбранных основных влияющих факторов (операндов) представлены в таблице.

Таблица. – Результаты расчета итоговой вероятности ошибки при обнаружении ДТП по видеопотоку

Этап задачи	Основные влияющие факторы	BHEP	HEP
Сканирование	Усталость (1,8) Видимость (0,6)	0,05	0,05
Выявление	Нагрузка (1,5) Интерфейс (1,1)	0,10	0,17
Верификация	Уровень подготовки (1,1) Стресс (1,3)	0,15	0,22
Реагирование	Процедуры (0,9) Поддержка (1,0)	0,07	0,06

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что наиболее уязвимым этапом является верификация события (HEP = 0,22). Это объясняется необходимостью опыта оператора ЦУДД для распознавания ДТП в условиях ограниченной видимости, а также наличием значительного эмоционального и физического напряжения как реакции организма оператора на воздействие неблагоприятных факторов.

Модель генерирует три типа выходных данных:

1. Профили рисков – таблицы вероятностей ошибок для типовых сценариев.
2. Динамические показатели – изменение вероятностей ошибок в течение смены.
3. Рекомендации по снижению рисков при работе оператора ЦУДД:
 - оптимальная продолжительность непрерывного мониторинга – не более 2 ч;
 - критическое число одновременно отслеживаемых видеопотоков – 6–8;
 - приоритетность модернизации интерфейсов ночной смены.

Разработанная модель позволяет не только оценивать текущие риски, но и проводить анализ «что-если» для различных организационных и технических сценариев, что делает ее ценным инструментом для повышения безопасности дорожного движения.

Модель ошибок оператора ЦУДД, разработанная на стыке транспортного планирования, когнитивной психологии, ИИ и эргономики, может быть эффективно встроена в существующие предиктивные системы безопасности дорожного движения. Архитектура интеграции предусматривает три уровня взаимодействия:

1. Данные оператора (вход модели), где особое внимание уделяется:
 - текущим PSF-параметрам (усталость, когнитивная нагрузка);
 - характеристикам рабочей среды, анализируемым с позиций эргономики;
 - истории принятия решений, что представляет интерес для алгоритмов ИИ.
2. Модель ошибок (обработка):
 - расчет вероятностей ошибок для активных задач с использованием подходов когнитивной психологии;
 - оценка комплексного риска на основе транспортного планирования;
 - генерация сценариев развития с применением алгоритмов ИИ.
3. Предиктивная система (выход):
 - коррекция прогнозов безопасности с учетом эргономических факторов;
 - формирование превентивных мер на основе транспортной аналитики;
 - обратная связь для адаптации с элементами машинного обучения.

Интеграция разработанных моделей человеческих ошибок в существующие предиктивные системы безопасности требует реализации нескольких взаимодополняющих механизмов, каждый из которых решает специфические задачи повышения точности прогнозирования [13].

Перспективным направлением является использование вероятностей человеческих ошибок в качестве дополнительных признаков для алгоритмов машинного обучения [14]. В этом случае входной вектор данных $X' = [X_{\text{traffic}}, X_{\text{weather}}, X_{\text{HEP}}]$ дополняется показателями, характеризующими текущее состояние оператора и вероятность ошибочных действий. Такой подход особенно эффективен для задач классификации рисков, где человеческий фактор традиционно учитывался лишь косвенно. Например, при прогнозировании вероятности ДТП на участке дороги система теперь может учитывать не только параметры транспортного потока и погодные условия, но и вероятность того, что оператор пропустит первые признаки развивающейся аварийной ситуации.

Альтернативный механизм предполагает использование HEP в качестве модификатора уровня риска. В этом случае после расчета базовой вероятности неблагоприятного события (R) система корректирует итоговую оценку вероятности после учета влияния человеческого фактора (R') по формуле

$$R' = R \times (1 + \alpha \times \text{HEP}_{\text{task}}),$$

где коэффициент α (обычно в диапазоне 0,2–0,5) определяет степень влияния человеческого фактора на конкретный тип риска.

Наиболее комплексный подход связан с генерацией превентивных сценариев на основе моделирования ошибок. Система выявляет критические сочетания факторов, такие как высокая когнитивная нагрузка оператора в условиях ухудшающейся видимости, и автоматически активирует дополнительные защитные механизмы. К ним относятся: увеличение частоты сканирования проблемных участков, предварительная настройка алгоритмов компьютерного зрения на обнаружение специфических типов инцидентов, автоматическая подготовка вариантов управляющих воздействий для оператора.

Особенностью предложенных механизмов является их способность работать в режиме реального времени, адаптируясь к изменяющимся условиям. Это достигается за счет непрерывного мониторинга PSF-параметров и динамического пересчета вероятностей ошибок при изменении рабочей обстановки в ЦУДД. Реализация таких механизмов требует тщательной калибровки и валидации, но обеспечивает принципиально новый уровень точности прогнозных моделей в ИТС.

Проведенное моделирование на стыке транспортного планирования, когнитивной психологии, ИИ и эргономики выявило важные закономерности в структуре человеческих ошибок операторов ЦУДД. Наибольшая вероятность ошибок (HEP 0,22–0,25) наблюдается в когнитивно сложных задачах, требующих:

- одновременной обработки множества визуальных сигналов;
- быстрого принятия решений в условиях неопределенности;
- интерпретации нечетких или противоречивых данных.

Особенно уязвимыми оказались ситуации:

- ночное время работы (коэффициент видимости 0,6–0,7);
- первые 30–40 мин после смены оператора;
- периоды одновременного возникновения нескольких инцидентов.

Полученные значения НЕР хорошо коррелируют с данными исследований в смежных областях (авиадиспетчерские службы – 0,15–0,30, железнодорожные диспетчеры – 0,10–0,25), что подтверждает адекватность модели.

Включение человеческого фактора в предиктивные системы открывает новые возможности и позволяет повысить точность прогнозов за счет учета дополнительного источника риска (ошибки оператора) и возможности прогнозировать каскадные события (пропуск инцидента → ДТП → затор). Также становится возможной динамическая адаптация систем путем автоматической коррекции интерфейсов при росте НЕР и перераспределения задач между операторами. Наконец, открывается возможность проактивного управления рисками, включая заблаговременное предупреждение о «критических часах», а также целевую подготовку операторов к сложным сценариям. Так, например, при прогнозируемом НЕР > 0,20 система может:

- активировать дополнительные алгоритмы детекции;
- увеличить частоту автоматических проверок;
- предложить временную поддержку второго оператора.

На основании результатов моделирования можно предложить ряд мер повышения надежности:

1) по оптимизации рабочих процессов:

- введение 15-минутных перерывов после каждых 2 ч непрерывного мониторинга;
- ротацию операторов между задачами разного типа;
- специальные протоколы для «критических периодов» (ночные смены, плохая видимость);

2) по улучшению интерфейсов:

- приоритетное отображение зон с высоким НЕР;
- автоматическую подсветку аномалий при усталости > 2.0;
- адаптивную компоновку мониторов в зависимости от нагрузки;

3) в подготовке персонала:

- тренировки на симуляторах с имитацией ошибок;
- когнитивные тренинги для сложных условий;
- систему наставничества для новых операторов;

4) организационные изменения:

- введение коэффициента НЕР в KPI (Key Performance Indicator, ключевой показатель эффективности работы центра);
- разработку «цифровых карт рисков» для различных смен;
- создание системы раннего оповещения при опасных сочетаниях факторов.

Все эти меры позволяют снизить базовую вероятность ошибок, что существенно влияет на общий уровень безопасности дорожного движения.

Несмотря на значительный потенциал предложенного подхода, исследование имеет несколько существенных ограничений. В первую очередь это дефицит эмпирических данных: отсутствие стандартизированных баз данных об ошибках операторов ЦУДД, сложность объективного измерения реальных показателей НЕР в рабочих условиях, ограниченная возможность валидации моделей на исторических событиях. Имеются методологические сложности, к которым относятся упрощение комплексных когнитивных процессов до дискретных вероятностей, статический характер большинства PSF-параметров (не учитывающий динамику изменения состояния), проблемы агрегирования индивидуальных различий между операторами. Имеют место достаточно сложные технические барьеры внедрения: необходимость модернизации существующих ИТС для интеграции PSF-моделей, отсутствие стандартов обмена данными между системами мониторинга операторов и предиктивными алгоритмами, вычислительная сложность работы в режиме реального времени. Наконец, следует принимать во внимание и организационные факторы: потенциальное сопротивление внедрению систем мониторинга ошибок со стороны персонала, этические вопросы, связанные с оценкой и прогнозированием человеческих ошибок, необходимость существенных изменений в корпоративной культуре безопасности.

Для преодоления названных ограничений и дальнейшего развития подхода целесообразны следующие направления научных исследований:

1) развитие методов сбора данных:

- разработка неинвазивных систем мониторинга состояния операторов (анализ движения глаз, физиологических показателей);
- создание специализированных симуляторов для генерации данных об ошибках;
- применение методов компьютерного зрения для автоматической фиксации действий оператора;

2) совершенствование моделей:

- разработка динамических PSF-моделей, учитывающих накопление усталости в течение смены, эффект обучения и адаптации, влияние командного взаимодействия;

- интеграция методов когнитивного моделирования с системами ИИ;
- создание персонализированных моделей для разных типов операторов;
- 3) прикладные исследования:
 - пилотные проекты внедрения в реальных ЦУДД;
 - сравнительный анализ эффективности различных методов HRA;
 - разработка стандартов оценки человеческого фактора в ИТС;
- 4) междисциплинарные исследования:
 - изучение нейрофизиологических основ принятия решений;
 - адаптация методов когнитивной эргономики для ЦУДД;
 - исследование организационных факторов, влияющих на надежность.

Перспективным направлением представляется создание цифровых двойников операторов, предоставляющих возможность проводить масштабное моделирование различных сценариев и условий работы. Особое внимание следует уделить этическим аспектам внедрения подобных систем и разработке механизмов защиты персональных данных операторов. Эти исследования помогут создать новое поколение интеллектуальных систем управления дорожным движением, в которых человеческий фактор будет не источником рисков, а важным компонентом системы безопасности.

Заключение. Проведенное исследование демонстрирует важность систематического учета человеческого фактора при проектировании современных ИТС. Разработанная методология моделирования ошибок операторов ЦУДД, объединяющая подходы транспортного планирования, когнитивной психологии, искусственного интеллекта и эргономики, создает основу для нового поколения предиктивных систем безопасности дорожного движения.

Основные результаты работы включают:

- разработку комплексной трехуровневой модели человеческих ошибок, интегрирующей качественные и количественные методы анализа;
- создание адаптированных PSF-профилей, учитывающих специфику задач операторов дорожного движения и параметры транспортных ситуаций;
- обоснование механизмов интеграции моделей ошибок в существующие предиктивные системы с использованием ИИ для динамической коррекции параметров ИТС;
- выявление наиболее уязвимых этапов в работе операторов (особенно в условиях ночного времени и высокой нагрузки).

Практическая значимость исследования заключается в возможности повышения точности прогнозирования ДТП за счет учета человеческого фактора, разработки конкретных рекомендаций по оптимизации рабочих процессов в ЦУДД, создания основы для интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием динамических моделей, учитывающих изменение когнитивного состояния оператора в реальном времени, созданием цифровых двойников для масштабного моделирования различных сценариев и разработкой этических стандартов использования подобных систем.

Внедрение предложенных решений позволит принципиально изменить подход к обеспечению безопасности дорожного движения, превратив человеческий фактор из источника рисков в управляемый компонент ИТС. Это особенно актуально в условиях роста сложности дорожной инфраструктуры и увеличения интенсивности транспортных потоков.

Исследование открывает новые направления для междисциплинарных работ на стыке транспортного моделирования и планирования, когнитивной психологии и ИИ, что может привести к созданию принципиально новых стандартов безопасности в управлении критически важной инфраструктурой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В., Богданович С.В., Чернюк А.Н. Анализ ошибок водителей как основной причины ДТП // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 1-1(88). – С. 100–110. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-1(88)-100-110
2. Бакланова К.В. Влияние параметров транспортного потока и характеристик дорог на безопасность дорожного движения // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2023. – № 2. – С. 99–110. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99-110
3. Гатиятуллин М.Х., Пекчёркин А.Г. Влияния транспортно-эксплуатационного состояния автомобильной дороги на аварийность на примере участка р-177 «Поветлужье» // Техника и технология транспорта. – 2022. – № 2(25). – С. 1–3.
4. Новикова И.И., Павлов Я.П. Мировые тенденции в развитии интеллектуальных транспортных систем // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2023. – № 9(103). – С. 152–155. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-9-152-155
5. Сырцова Е.А. Эффекты внедрения интеллектуальных транспортных систем в регионах России // Государственное управление. Электронный вестник. – 2023. – № 101. – С. 159–169. DOI: 10.24412/2070-1381-2023-101-159-169

6. Бажина М.А. Интеллектуальные транспортные системы – основа de lege ferenda транспортной системы Российской Федерации // *Journal of Digital Technologies and Law*. – 2023. – Т. 1, № 3. – С. 629–649. DOI: 10.21202/jdtl.2023.27
7. Ильина И.Е., Витвицкий Е.Е. Индексы для оценки уровня безопасности дорожного движения в регионах // *Вестн. СибАДИ*. – 2025. – Т. 22, № 1(101). – С. 68–77. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77
8. Hollnagel, E. *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. – Oxford: Elsevier. – 1998. – 287 p.
9. Вероятностный анализ безопасности атомных станций (ВАБ) / В.В. Бегун, О.В. Горбунов, И.Н. Коленко и др. – Киев: КПИ, 2000. – 568 с.
10. Swain A.D., Guttman H.E. *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. Final Report* // Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-1278. – Washington, 1983. – 728 p.
11. Stojiljkovic E., Bijelic B., Cvetkovic M. Application of Heart Technique for Human Reliability Assessment – a Serbian Experience // *Facta universitatis. Series: Working and Living Environmental Protection*. – 2017. – Vol. 14, No 3. – P. 187–196. DOI: 10.22190/FUWLEP1703187S
12. The SPAR-H Human Reliability Analysis Method / D. Gertman, H. Blackman, J. Marble et al. // Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-6883. – Washington, 2005. – 230 p.
13. Полежаев М.Н., Финогеев А.А. Предиктивный анализ показателей критических событий с помощью рекуррентной нейронной сети с трансформером // *Современные наукоемкие технологии*. – 2024. – № 4. – С. 63–68. DOI: 10.17513/snt.39974
14. Enhancing road safety with machine learning: Current advances and future directions in accident prediction using non-visual data / A. B. Z. Chai, B. T. Lau, M. K. T. Tee et al. // *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. – 2024. – V. 137, Iss. P.A. DOI: 10.1016/J.ENGAPPAI.2024.109086

REFERENCES

1. Kapskii, D.V., Bogdanovich, S.V. & Chernyuk, A.N. (2025). Analiz oshibok voditelei kak osnovnoi prichiny DTP [Czerniuk Analysis of driver errors as the primary cause of road traffic accidents]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin [World of transport and technological machines]*, 1-1(88), 100–110. DOI: 10.33979/2073-7432-2025-1-1(88)-100-110 (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Baklanova, K.V. (2023). Vliyanie parametrov transportnogo potoka i kharakteristik dorog na bezopasnost' dorozhnogo dvizhe-niya [Influence of traffic flow parameters and road characteristics on road safety]. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii [Intellect. Innovations. Investments]*, (2), 99–110. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-2-99-110 (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Gatiyatullin, M.Kh. & Pekcherkin, A.G. (2022). Vliyaniya transportno-ekspluatatsionnogo sostoyaniya avtomobil'noi dorogi na avariinost' na primere uchastka r-177 «Povetluzh'e» [Impact of Transport and Operation State of the Road on Accident Rate on the Example of the R-177 “Povetluzhye”]. *Tekhnika i tekhnologiya transporta [Transport equipment and technology]*, 2(25), 1–3. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Novikova, I.I. & Pavlov, Ya.P. (2023). Mirovye tendentsii v razvitiu intellektual'nykh transportnykh sistem [Global Trends in the Development of Intelligent Transport Systems]. *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika [Economy and business: theory and practice]*, 9(103), 152–155. DOI: 10.24412/2411-0450-2023-9-152-155 (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Syrtsova, E.A. (2023). Effekty vnedreniya intellektual'nykh transportnykh sistem v regionakh Rossii [Effects of Intelligent Transport Systems Deployment in Russian Regions]. *Gosudarstvennoe upravlenie. Elektronnyi vestnik [Public administration. Electronic Bulletin]*, (101), 159–169. DOI: 10.24412/2070-1381-2023-101-159-169 (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Bazhina, M.A. (2023). Intellektual'nye transportnye sistemy – osnova de lege ferenda transportnoi sistemy Rossiiskoi Federatsii [Intelligent Transport Systems as the Basis de Lege Ferenda of the Transport System of the Russian Federation]. *Journal of Digital Technologies and Law*, 1(3), 629–649. DOI: 10.21202/jdtl.2023.27 (In Russ.).
7. Il'ina, I.E. & Vitvitskii, E.E. (2025). Indeksy dlya otsenki urovnya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v regionakh [Indices for Assessing Road Safety Levels in the Regions of Russia]. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta [The Russian Automobile and Highway Industry Journal]*, 22(1(101)), 68–77. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-68-77 (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Hollnagel, E. (1998). *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. Oxford: Elsevier.
9. Begun, V.V., Gorbunov, O.V., Kolenko, I.N., Pis'mennyi, E.N., Zenyuk, A.Yu. & Litvinskii, L.L. (2000). *Veroyatnostnyi analiz bezopasnosti atomnykh stantsii (VAB)*. Kiev: KPI. (In Russ.).
10. Swain, A.D. & Guttman, H.E. (1983). *Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications. Final Report*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-1278. Washington.
11. Stojiljkovic, E., Bijelic, B. & Cvetkovic, M. (2017). Application of Heart Technique for Human Reliability Assessment – a Serbian Experience. *Facta universitatis. Series: Working and Living Environmental Protection*, 14(3), 187–196. DOI: 10.22190/FUWLEP1703187S
12. Gertman, D., Blackman, H., Marble, J., Byers, J. & Smith, C. (2005). *The SPAR-H Human Reliability Analysis Method*. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. NUREG/CR-6883. Washington.
13. Polezhaev, M.N. & Finogeev, A.A. (2024). Prediktivnyi analiz pokazatelei kriticheskikh sobytii s pomoshch'yu rekurrentnoi neuronnoi seti s transformerom. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*, (4), 63–68. DOI: 10.17513/snt.39974 (In Russ.).
14. Lau, B. T., Tee, M. K. T. & McCarthy, C. (2024). Enhancing road safety with machine learning: Current advances and future directions in accident prediction using non-visual data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 137(P.A.). DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109086

**FEATURES OF MODELING HUMAN ERRORS
IN ROAD INFRASTRUCTURE MONITORING AND MANAGEMENT PROBLEMS
FOR INTEGRATION INTO PREDICTIVE SAFETY SYSTEMS**

S. BOGDANOVICH

(Belarusian National Technical University, Minsk)

P. BALTRUKOVICH

(Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

The article considers modern methods of modeling human errors of traffic control center operators for their subsequent integration into predictive safety systems of transport infrastructure. A comprehensive three-level analytical model has been developed that organically combines qualitative and quantitative assessment methods, including detailed PSF profiles that allow one to assess the influence of key factors: the degree of operator fatigue, the level of cognitive load, the ergonomics of workplaces and the quality of visual interfaces on the probability of operator errors. Particular attention is paid to the interdisciplinary approach that combines the methods of transport planning, cognitive psychology, artificial intelligence and ergonomics. Practical mechanisms for integrating the model into intelligent transport systems are proposed. Among them are the dynamic adjustment of predictive algorithms taking into account the actual values of the probability of operator errors and the automation of preventive control actions. The conducted studies demonstrate that systematic consideration of the human factor can significantly improve the accuracy and reliability of predictive safety systems, reducing the number of accidents.

Keywords: *human factors, PSF profiles, predictive systems, road safety, operator error probability, intelligent transport systems, cognitive ergonomics, artificial intelligence.*

УДК 656.015

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-26-33

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТОФОРНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТРАМВАЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ

*(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск;
Белорусский национальный технический университет, Минск;
Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Минск)
А.А. КУСТЕНКО*

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*д-р техн. наук, проф. О.Н. ЛАРИН
(Российский университет транспорта, Москва)*

Представлены результаты исследования факторов, влияющих на эффективность трамвайного движения в городской агломерации г. Минска. Основное внимание уделено анализу задержек на регулируемых перекрестках и временным затратам, связанным с остановками трамваев на остановочных пунктах. На основе статистического анализа и математического моделирования разработана прогнозная модель времени прибытия трамваев к светофорным объектам (СФО), учитывающая такие параметры, как длительность светофорного цикла, расстояние между остановками, интенсивность пассажирообмена и технические характеристики трамваев. Выявлена прямая зависимость времени простоя трамваев на остановочных пунктах от интенсивности пассажирообмена. Результаты исследования имеют практическую значимость для повышения эффективности функционирования трамвайной сети, включая корректировку светофорных циклов, улучшение расписания и планирование новых маршрутов.

Ключевые слова: *трамвайное движение, задержки, регулируемые объекты, нерегулируемые объекты, светофорные объекты, пассажирообмен, остановочные пункты, математическая модель, скорость сообщения, городской транспорт.*

Введение. Трамвайное движение представляет собой важный компонент городской транспортной инфраструктуры, обеспечивающий экологически устойчивую и эффективную перевозку пассажиров. Однако его функционирование зависит от множества факторов, которые могут значительно снижать его эффективность. К числу таких факторов относятся задержки на регулируемых и нерегулируемых объектах, дорожно-транспортные происшествия (ДТП), а также временные потери, связанные с остановками на пассажирских пунктах. В условиях урбанизации и роста транспортной нагрузки на городские магистрали актуальность исследований, направленных на минимизацию данных факторов, становится особенно высокой [1].

В рамках настоящего исследования проанализировано влияние различных факторов на эффективность функционирования трамвайного движения в городской агломерации Минска. Основное внимание уделено изучению задержек, возникающих на регулируемых и нерегулируемых объектах, а также временным затратам, связанным с остановками трамваев на пассажирских пунктах. В качестве объекта исследования выбрана маршрутная сеть г. Минска. Для обработки данных использованы методы статистического анализа и математического моделирования, что позволило выявить ключевые закономерности и разработать прогнозные модели.

Целью исследования является разработка научно обоснованных рекомендаций по оптимизации трамвайного движения, направленных на снижение временных потерь и повышение скорости сообщения. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Проведен анализ влияния регулируемых и нерегулируемых объектов на временные задержки трамваев.
2. Исследована зависимость времени прибытия трамваев к светофорным объектам от параметров светофорного цикла.
3. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать время прибытия трамваев к СФО с учетом различных факторов.
4. Изучена зависимость времени простоя трамваев на остановочных пунктах от интенсивности пассажирообмена.
5. Проанализировано влияние протяженности участка безостановочного движения на скорость движения трамваев.

Результаты исследования имеют практическую значимость для оптимизации работы трамвайной сети, включая корректировку светофорных циклов, улучшение расписания движения и планирование новых маршрутов. Это позволит снизить временные потери, повысить скорость сообщения и, как следствие, улучшить качество транспортного обслуживания населения.

Основная часть. Примем скорость сообщения трамвая и, как следствие, задержки в трамвайном движении за критерий эффективности дорожного движения с участием трамвая (ДДУТ). Определим степень влияния

регулируемых, нерегулируемых объектов и ДТП с участием трамвая или на трамвайном полотне на эффективность ДДУТ [1; 2]. Для этого исследовалась работа трамвая на трамвайной сети г. Минска.

Сопоставим полученные результаты времени задержки на регулируемых и нерегулируемых объектах и задержки в результате ДТП как с участием трамвая, так и ДТП на трамвайном полотне без участия трамвая, но приведшие к задержкам в трамвайном движении. Для этого приведем полученное значение к годовым значениям:

- задержки на регулируемых объектах: 20 396 ч;
- задержки на нерегулируемых объектах: 1 485 ч;
- задержки при ДТП в год: 80,1 ч.

Для наиболее наглядного представления построим диаграмму, отражающую структуру суммарных задержек (рисунок 1).

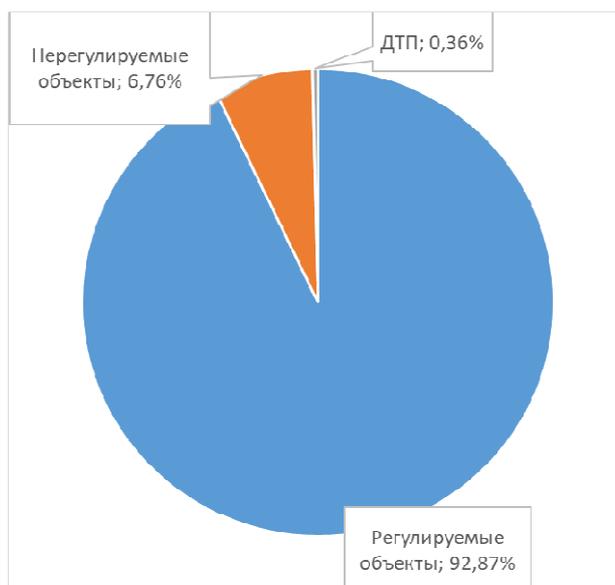


Рисунок 1. – Структура факторов дорожного движения, влияющих на дорожное движение с участием трамвая

Итак, наибольшее влияние на эффективность трамвайного движения оказывают задержки трамвая у регулируемых объектов.

Дальнейшие исследования были направлены на изучение различных аспектов влияния регулируемых объектов на трамвайное движение.

Замечено, что на задержки у регулируемых объектов влияют следующие факторы:

- продолжительность разрешающего сигнала светофора для трамваев;
- время прибытия трамвая к СФО;
- расположение СФО относительно остановочного пункта (ОП) трамвая.

Рассмотрим их подробнее.

Исследование времени прибытия трамвая к СФО относительно времени цикла. Трамвай движется не в потоке, поэтому его прибытие к СФО не растягивается на длительное время, как при движении автомобильного транспортного потока. Значит, можно предположить, что трамваю не требуется длительная фаза светофора для проезда СФО. Также можно предположить, что большинство трамваев пребывают к СФО в определенное время светофорного цикла и разброс во времени прибытия трамвая зависит от количества ОП перед СФО [3; 4].

Для проверки гипотезы были проведены исследование на трех различных СФО с различным количеством ОП перед ним (от 0 до 2). Все измерения на каждом СФО производились в одном плане координации, тем самым время сдвига включения трамвайной фазы ($t_{сд}$) и время цикла (C_i) одинаковы для всех замеров на каждом СФО. Замеры проводились в солнечную погоду в межпиковое время движения трамваев.

В качестве примера полученных результатов на рисунке 2 приведены данные по количеству прибытий трамвая к регулируемому объекту на перекрестке Старовиленский тракт – ул. Нововиленская в направлении от ДС «Озеро».

Из проведенного анализа по составленным гистограммам на перекрестке ул. Я. Колоса – ул. Дорошевича (перед СФО нет ОП) 62% трамваев прибывают в интервале 10 с; на перекрестке ул. Куйбышева – пр-т Машерова (перед СФО один ОП) – 70% трамваев в интервале 15 с; на перекрестке Старовиленский тракт – ул. Нововиленская (перед СФО два ОП) – 62% трамваев в интервале 25 с.

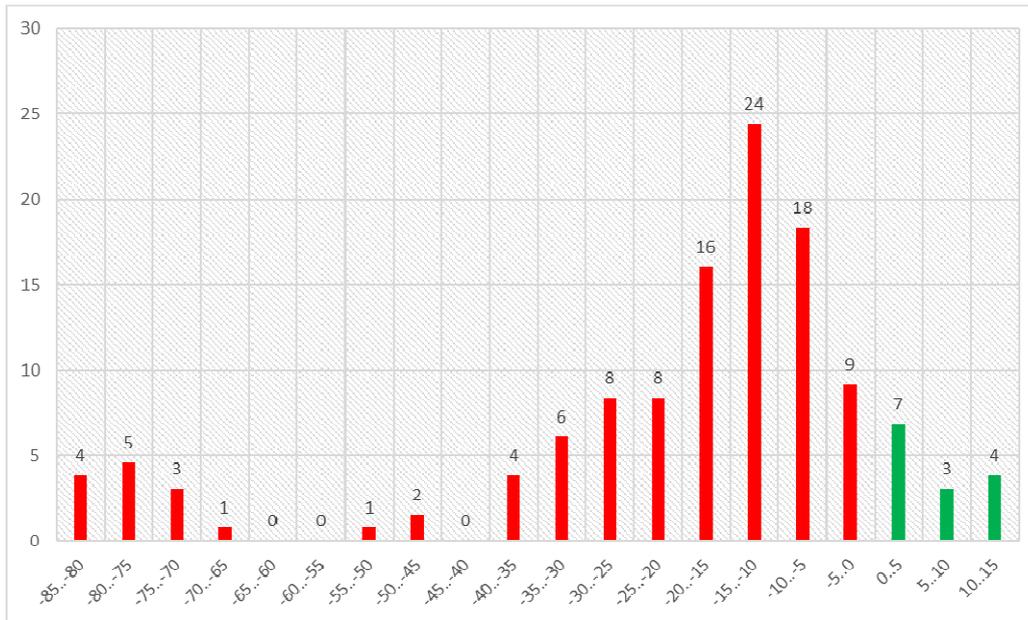


Рисунок 2. – Распределение прибытий трамвая к регулируемому объекту на перекрестке Старовиленский тракт – ул. Нововиленская

Таким образом, прибытие трамвая к СФО не носит случайный характер и предопределено следующими факторами:

- время проезда, предшествующего СФО;
- наличие и количество остановочных пунктов между двумя СФО;
- наличие иных конфликтных потоков участников дорожного движения (пешеходных, автомобильных или велосипедных).

Составление математической модели прибытия трамвая к СФО относительно времени цикла. В процессе наблюдения за движением трамвая между ОП была отмечена предопределенность прибытия трамвая к регулируемым объектам, т.е. трамваи с большей долей вероятности прибывают к регулируемому объекту в определенный интервал светофорного цикла. Данную закономерность можно использовать при организации трамвайного движения для повышения эффективности за счет регулирования отправления трамвая с конечных и промежуточных ОП.

Для подтверждения данной гипотезы и исследования наблюдаемой закономерности проведены исследования на регулируемых объектах, расположенных после перегонов с различными условиями движения трамвая (наличие нерегулируемых пешеходных переходов, остановочных пунктов, с проездом по середине проезжей части и на обособленном полотне).

На время прибытия к СФО влияют следующие факторы дорожного движения (ДД) [1; 5–7]:

- время отправления от предыдущего СФО1;
- время сдвига включения «зеленого» сигнала светофора на двух соседних СФО;
- время движения по перегону между соседними СФО;
- наличие или отсутствие на перегоне ОП и время простоя трамвая на нем;
- прочие возможные факторы, задерживающие трамвай на перегоне.

Кроме факторов ДД на время прибытия трамваев имеют значение [5; 9–12]:

- время суток (в зависимости от времени суток загруженность дорог может существенно отличаться, что сказывается на скорости движения трамваев и, как следствие, на времени их прибытия);
- расписание движения трамваев (если расписание не отлажено или не соответствует текущей ситуации на дорогах, то прибытие трамваев к регулируемому объекту может приводить к задержкам трамвая);
- погодные условия (непогода, такая как дождь, снег или сильный ветер, может существенно усложнить движение транспорта и повлиять на время прибытия трамваев к регулируемому объекту);
- техническое состояние трамвая;
- опыт водителя трамвая.

Обозначив время прибытия трамвая относительно начала включения зеленого сигнала СФО2, можно определить, будет ли задержка трамвая на данном СФО2 и ее продолжительность. Появляется возможность за счет управления продолжительностью и временем включения светофорных фаз влиять на время задержки трамвая перед СФО2 и, значит, на эффективность ДДУТ.

Все ранее определенные факторы ДД, влияющие на время прибытия трамвая к СФО2, можно записать в виде модели, которая рассчитывает время прибытия трамвая к СФО2 относительно начала включения «зеленого» сигнала светофора.

На основании исследований предложена аналитическая модель расчета времени прибытия трамвая к стоп-линии СФО2 в светофорном цикле в зависимости от времени простоя на ОП и длины перегона между СФО (рисунок 3).

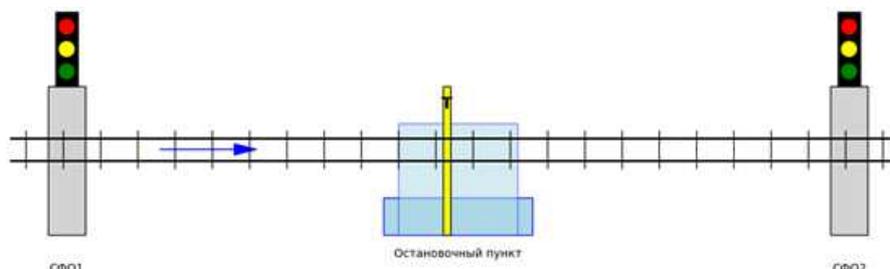


Рисунок 3. – Визуализация перегона между двумя СФО

Время прибытие к СФО2 относительно времени начала светофорного цикла:

$$t_{\text{прт}}^{\text{сфо}} = \left(t_{\text{дв}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} t_{\text{оп}i} + t_o - t_{\text{сд}} \right) \text{mod } C, \text{ с,}$$

- где $t_{\text{дв}}$ – время движения по участку маршрута, между СФО, с;
- C – время цикла СФО2, с;
- t_o – время отправления от СФО1, относительно времени включения «зеленого» сигнала СФО2, с;
- $t_{\text{сд}}$ – временной сдвиг между включением «зеленого» сигнала цикла на двух соседних СФО, с;
- $t_{\text{оп}i}$ – время простоя на i -ом ОП, с;
- $n_{\text{оп}}$ – количество ОП на участке маршрута, между регулируемым объектами.

Время на движение трамвая между СФО состоит из времени равноускоренного движения и времени остановок. Остановки могут быть технологическими (на ОП трамвая) и вызванными конфликтом с другими участниками дорожного движения.

После раскрытия в формуле значения параметра времени движения модель расчета времени прибытия трамвая к СФО примет следующий вид:

$$t_{\text{прт}}^{\text{сфо}} = \left(\sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} \left(\frac{t_{\text{дв}i} \cdot a_{\text{т}} + V_{\text{т}i}^2}{a_{\text{т}} \cdot V_{\text{т}i}} \right) + \sum_{i=1}^{n_{\text{оп}i}} t_{\text{оп}i} + t_o - t_{\text{сд}} \right) \text{mod } C.$$

Для упрощения работы с полученной целевой функцией введем безразмерную величину – коэффициент синхронизации светофорных фаз (η_c):

$$\eta_c = \left\{ \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} \left(\frac{t_{\text{дв}i} \cdot a_{\text{т}} + V_{\text{т}i}^2}{a_{\text{т}} \cdot V_{\text{т}i}} \right) + \sum_{i=1}^{n_{\text{оп}i}} t_{\text{оп}i} + t_o - t_{\text{сд}} \right)}{C} \right\}.$$

(Примечание: фигурные скобки обозначают дробную часть от деления).

Таким образом, функция расчета времени прибытия трамвая к СФО2 примет следующий вид:

$$t_{\text{прт}}^{\text{сфо}} = \eta_c \cdot C,$$

- где η_c – коэффициент синхронизации светофорных фаз.
- Коэффициент η_c изменяется от 0 до 1.
- Значение коэффициента η_c , равное 0 и близкое к 1, указывает на прибытие трамвая в начале разрешающего сигнала СФО2.
- Значение η_c позволяет путем сравнения с долей «зеленого сигнала» в светофорном цикле СФО2 (λ) определить, проедет трамвай без остановки СФО2 или остановится на запрещающий сигнал светофора СФО2:
 - $\lambda \leq \eta_c$ – трамвай прибывает на запрещающий сигнал светофора СФО2;
 - $\lambda > \eta_c$ – трамвай прибывает на разрешающий сигнал светофора СФО2,

где λ – доля разрешающего сигнала для трамвая в светофорном цикле,

$$\lambda = \frac{t_{\text{св}}}{c}$$

В полученной модели остаются неизвестными параметры времени простоя трамвая на ОП ($t_{\text{они}}$) и максимальная скорость трамвая на i -ом участке транспортной сети (V_{Ti}).

Технологические особенности работы трамвая как маршрутного пассажирского транспортного средства обязывает трамвай осуществлять остановки для посадки и высадки пассажиров. Продолжительность простоя на остановочных пунктах напрямую влияет на эффективность ДДУТ. Для трамвайного движения колебания времени простоя на ОП приводит к сбою в регулярности движения трамвая. Кроме того, трамвай может выпасть из «зеленой волны», дополнительно теряя время на простой на светофорных объектах.

Основное влияние на время простоя на ОП оказывает время посадки-высадки пассажиров, остальные факторы косвенны и могут быть минимизированы за счет применения технических решений, таких как кнопка открытия дверей по требованию пассажира и автомат по продаже талонов в салоне трамвая.

Время посадки-высадки напрямую зависит от пассажирообмена на ОП.

Пассажирообмен остановочного пункта ($Q_{\text{пас.об}}$) – это суммарное число пассажиров, подходящих на остановочный пункт и садящихся в транспортное средство, и пассажиров, выходящих из салона пассажирского транспортного средства на данном остановочном пункте в единицу времени.

Построим точечный график с последующим подбором подходящей аппроксимирующей функции (линии тренда) (рисунок 4).

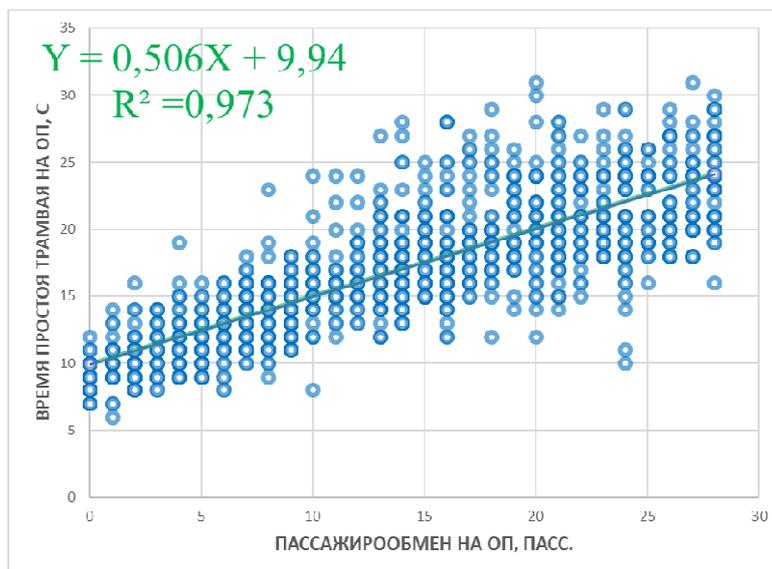


Рисунок 4. – Зависимость времени простоя трамвая на остановочном пункте от пассажирообмена на нем

Используя данные, подробно рассмотрим параметры полученного уравнения регрессии и значимость полученного уравнения (таблица 1).

Таблица 1. – Регрессионная статистика и дисперсионный анализ

Регрессионная статистика					
Множественный R					0,986
R-квадрат					0,973
Нормированный R-квадрат					0,972
Стандартная ошибка					0,727
Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	1	520,2	520,20	983,9	8,86E-23
Остаток	27	14,27	0,528		
Итого	28	534,5			

Модель регрессии показывает, что пассажирообмен является статистически значимым предиктором времени простоя трамвая. Высокий R-квадрат и низкая стандартная ошибка свидетельствуют, что модель хорошо описывает данные. F-статистика и ее p-значение подтверждают, что модель в целом значима.

Модель демонстрирует высокую точность, т.к. большинство остатков малы и близки к нулю. Отсутствие систематических ошибок (среднее значение остатков близко к нулю) указывает на то, что модель хорошо калибрована.

Таким образом, если водитель трамвая не продает талоны пассажиру, время простоя на ОП трамвая можно определить по формуле

$$t_{on} = \frac{t_n}{n_d} \cdot Q_{пас.об} + t_{о-з,д}, \text{ с,}$$

где t_n – время посадки-высадки пассажиров с учетом распределения по всем дверям ($t_n = 1,25$ с);
 n_d – количество дверей в трамвае, $n_d = 2,5$ (передняя дверь трамвая обеспечивает движение пассажиров только в одном направлении);

$Q_{пас.об}$ – пассажирооборот на ОП, пасс.;

$t_{о-з,д}$ – время открытия и закрытия дверей трамвая, с ($t_{о-з,д} = 9,9$ с).

Скорость трамвая зависит от многих факторов: характеристик трамвайного вагона, состояния и расположения трамвайного полотна, интенсивности транспортного потока (если трамвай движется совместно с транспортным потоком), организации дорожного движения, расстояния между остановками трамвая [4; 5].

Для транспортной сети г. Минска и трамваев АКСМ601 скорости варьируются от 20 до 50 км/ч в зависимости от участка транспортной сети и расстояния между остановками трамвая.

С целью определения влияния протяженности участка безостановочного движения на скорость трамвая для трамвайной сети г. Минска и трамвая АКСМ601 проведены исследования на трамвайной сети г. Минска. Выбраны прямолинейные участки от 50 до 1000 м с минимальным влиянием факторов дорожного движения. Замеры производились в межпиковое время в сухую погоду. Скорость замерялась прибором Drag-ON 2 с точностью измерения до 0,01 км/ч.

Построим точечный график с последующим подбором подходящей аппроксимирующей функции (линии тренда) (рисунок 5).

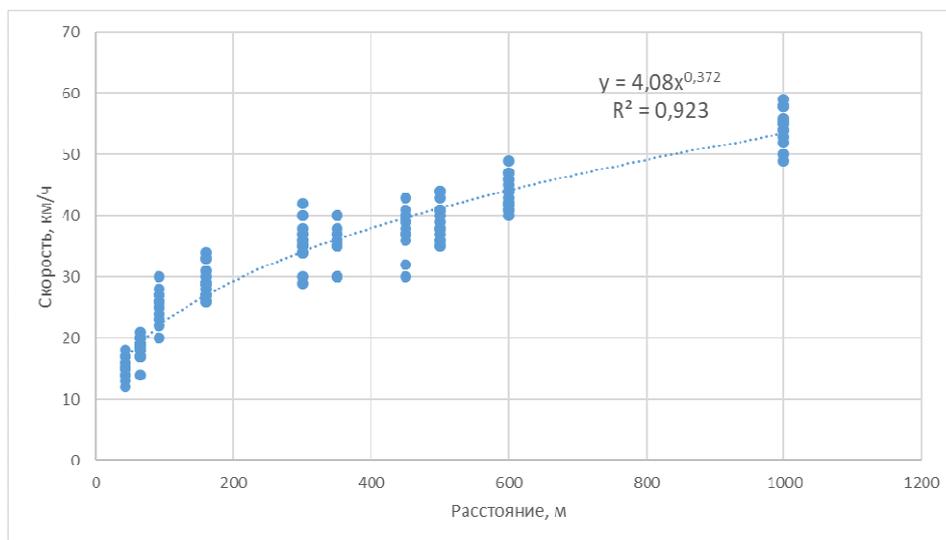


Рисунок 5. – Зависимость скорости движения трамваев от протяженности участка безостановочного движения

После анализа данных подробно рассмотрим параметры полученного уравнения регрессии и значимость полученного уравнения (таблица 2).

Таблица 2. – Регрессионная статистика и дисперсионный анализ

Регрессионная статистика					
Множественный R					0,9571
R-квадрат					0,916
Нормированный R-квадрат					0,9055
Стандартная ошибка					3,648
Дисперсионный анализ					
	df	SS	MS	F	Значимость F
Регрессия	1	1162,14	1162,14	87,3	1,41E-05
Остаток	8	106,48	13,31		
Итого	9	1268,6			

Модель регрессии статистически значима и хорошо объясняет вариацию зависимой переменной. Высокий R^2 и низкая стандартная ошибка указывают на высокую точность модели. Остатки случайно распределены вокруг нуля, что подтверждает адекватность модели. Гетероскедастичность отсутствует. Выбросы не обнаружены. Распределение остатков близко к нормальному. Это позволяет сделать вывод, что модель хорошо описывает данные и ее можно использовать для прогнозирования.

На основе результатов исследования запишем зависимость между скоростью трамвая и протяженностью участка безостановочного движения:

$$V_m = a \cdot l_{ум}^b, \text{ км/ч}, \quad (1)$$

где a и b – коэффициенты, учитывающие разрешенную скорость, особенности технического состояния трамвая и трамвайного полотна и особенности психоэмоционального состояния водителей трамвая, опережение или отставания от расписания.

Таким образом a и b в формуле (1) для транспортной сети г. Минска составят $a = 4,08$ и $b = 0,37$.

Заключение. В рамках проведенного исследования определены ключевые факторы, оказывающие влияние на ДДУТ, а также дана оценка степени их воздействия на эффективность функционирования трамвайной системы. В частности, проанализированы временные параметры простоя трамваев на ОП, что позволило выявить закономерности, связанные с процессами посадки-высадки пассажиров и операциями открытия-закрытия дверей.

На основе собранных эмпирических данных была разработана регрессионная модель, которая позволила определить среднее время, затрачиваемое на посадку-высадку одного пассажира, а также временные интервалы, связанные с функционированием дверных механизмов для трамваев, эксплуатируемых в г. Минске. По результатам анализа полученных данных выведена аналитическая формула для расчета времени простоя трамваев на ОП в зависимости от интенсивности пассажирообмена. Данная формула учитывает такие параметры, как количество пассажиров, время, необходимое для выполнения операций с дверьми, и другие факторы, влияющие на продолжительность остановки. Кроме того, в ходе исследования была изучена зависимость максимальной скорости движения трамвая от протяженности участка пути.

На основе экспериментальных данных построена степенная регрессионная модель, которая описывает взаимосвязь между длиной участка, разрешенной скоростью движения, техническим состоянием трамвая и состоянием трамвайного полотна. Данная модель позволяет прогнозировать максимальную скорость трамвая на различных участках маршрута с учетом указанных факторов. Важным результатом исследования стала разработка целевой функции, которая определяет время прибытия трамвая к СФО относительно длительности светофорного цикла. Эта функция учитывает как скорость движения трамвая, так и время его простоя на ОП, что позволяет более точно прогнозировать время прибытия транспортного средства к СФО. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации планов координации движения трамваев и определения времени задержки на светофорных объектах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Координированное управление дорожным движением / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Д.В. Рожанский и др. – Минск: БНТУ, 2011. – 230 с.
2. Кустенко, А.А. Оценка влияния скорости движения на величину потерь // Дальний восток. Автомобильный дороги и безопасность движения: межвуз. сб. науч. тр. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2009. – № 9. – 44 с.
3. Некоторые вопросы исследования пассажиропотока в трамвайном движении / А.А. Кустенко, Д.В. Капский, Н.А. Филиппова и др. // Реализация транспортной стратегии РФ до 2030 года в части развития автотранспортного комплекса: сб. науч. тр. 11-й Междунар. науч.-практ. конф. / Махачкала (20 марта 2025 г.). – М: Перо, 2025. – С. 46–50.
4. Мирончук А.А., Добрынина Ю.Ю. Исследование влияния расстояния между остановочными пунктами на скорость движения трамвая // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 4(64). – С. 39.
5. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 239 с.
6. Основы автоматизации интеллектуальных транспортных систем: учеб. / Д.В. Капский, Е.Н. Кот, С.В. Богданович и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 412 с.
7. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
8. Влияние системы организации перевозок на экологические параметры работы автомобильного транспорта / Д.В. Капский, В.Н. Седюкевич, В.К. Ярошевич и др. // Вестн. Белорус. гос. ун-та транспорта: Наука и транспорт. – 2005. – № 1(10). – С. 49–51.
9. Леонович И.И., Врубель Ю.А., Капский Д.В. Теоретические основы определения экологических потерь в дорожном движении // Эколог. вестн. – 2007. – № 1. – С. 103–111.
10. Оценка транспортных передвижений в симбиотическом городе / Д.В. Капский, В.Н. Кузьменко, Д.В. Мозалевский и др. // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. / Гомель (25–26 нояб. 2021 г.) / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: Белорус. гос. ун-т транспорта, 2021. – Ч. 2. – С. 80–82.
11. Капский Д.В. Разработка мероприятий по повышению безопасности движения на регулируемых перекрестках // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2005. – № 1. – С. 55–58.

12. Внедрение плана устойчивой мобильности для создания симбиотического города / Д.В. Капский, В.Н. Кузьменко, Д.В. Мозалевский и др. // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. / Гомель (25–26 нояб. 2021 г.) / под общ. ред. Ю.И. Кулаженко. – Гомель: Белорус. гос. ун-т транспорта, 2021. – Ч. 2. – С. 72–74.

REFERENCES

1. Vruble', Y.A., Kapskii, D.V., Rozhanskii, D.V., Navoi, D.V. & Kot, E.Ni. (2011). *Koordinirovannoe upravlenie dorozhnym dvizheniem*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
2. Kusten'ko, A.A. (2009). Otsenka vliyaniya skorosti dvizheniya na velichinu poter'. *Dal'nii vostok. Avtomobil'nyi dorogi i bezopasnost' dvizheniya*, (9). Khabarovsk: Izd-vo Tikhookeanskogo gosudarstvennogo universiteta. (In Russ.).
3. Kusten'ko, A.A., Kapskii, D.V., Filippova, N.A. & Sovetbekov, B.S. (2025). Nekotorye voprosy issledovaniya passazhiropotoka v tramvainom dvizhenii. *Realizatsiya transportnoi strategii RF do 2030 goda v chasti razvitiya avtotransportnogo kompleksa: sbornik nauchnykh trudov 11-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Makhachkala, 20 marta 2025 goda (46–50)*. Moscow: Pero. (In Russ.).
4. Mironchuk, A.A. & Dobrynina, Yu.Yu. (2020). Issledovanie vliyaniya rasstoyaniya mezhdu ostanovochnymi punktami na skorost' dvizheniya tramvaya. *Inzhenernyi vestnik Dona*, 4(64), 39. (In Russ.).
5. Vruble', Y.A., Kapskii, D.V. & Kot, E.Ni. (2006). *Opreделение poter' v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
6. Kapskii, D.V., Kot, E.N., Bogdanovich, S.V., Larin, O.N. & Semchenkov, S.S. (2022). *Osnovy avtomatizatsii intellektual'nykh transportnykh sistem*. Vologda: Infra-Inzheneriya. (In Russ.).
7. Kapskii, D.V. (2008). *Prognozirovaniye avariinosti v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
8. Kapskii, D.V., Sedyukevich, V.N., Yaroshevich, V.K. & Karasevich, S.N. (2005). Vliyanie sistemy organizatsii perevozok na ekologicheskie parametry raboty avtomobil'nogo transporta. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta transporta: Nauka i transport*, 1(10), 49–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Leonovich, I.I., Vruble', Yu.A. & Kapskii, D.V. (2007). Teoreticheskie osnovy opredeleniya ekologicheskikh poter' v dorozhnom dvizhenii [Theoretical Bases of Definition of Ecological Losses in Traffic]. *Ekologicheskii vestnik*, (1), 103–111. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Kapskii, D.V., Kuz'menko, V.N., Mozal'evskii, D.V., Korzhova, A.V., Krasil'nikova, A.S., Karaseva, M.G. & Kusten'ko, A.A. (2021). Otsenka transportnykh peredvizhenii v simbioticheskom gorode. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Gomel', 25–26 noyabrya 2021 goda*. Chast' 2, (80–82). Gomel': Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta. (In Russ.).
11. Kapskii, D.V. (2005). Razrabotka meropriyatiy po povysheniyu bezopasnosti dvizheniya na reguliruemyykh perekrestkakh. *Vestnik Belorusskogo natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta* (1), 55–58. (In Russ.).
12. Kapskii, D.V., Kuz'menko, V.N., Mozal'evskii, D.V., Korzhova, A.V., Krasil'nikova, A.S., Karaseva, M.G. & Kusten'ko, A.A. (2021). Vnedrenie plana ustoychivoi mobil'nosti dlya sozdaniya simbioticheskogo goroda. *Problemy bezopasnosti na transporte: materialy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Gomel', 25–26 noyabrya 2021 goda*. Chast' 2, (72–74). Gomel': Belorusskii gosudarstvennyi universitet transporta. (In Russ.).

Поступила 11.06.2025

STUDY OF THE IMPACT OF TRAFFIC LIGHT REGULATION ON THE EFFICIENCY OF TRAM TRAFFIC

D. KAPSKI

*(Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk;
Belarusian National Technical University, Minsk;*

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus, Minsk)

A. KUSTENKA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

O. LARIN

(Russian University of Transport, Moscow)

The article presents the results of a study on factors affecting the efficiency of tram traffic in the urban agglomeration of Minsk. The main focus is on the analysis of delays at regulated intersections, as well as time costs associated with tram stops at stations. A predictive model of tram arrival times at traffic light objects (TLOs) has been developed based on statistical analysis and mathematical modeling. A direct correlation between tram dwell time at stations and passenger exchange intensity has also been identified. The results of the study have practical significance for improving the efficiency of tram network operations, including adjustments to traffic light cycles, schedule optimization, and planning of new routes.

Keywords: tram traffic, delays, regulated intersections, unregulated intersections, traffic light objects, passenger exchange, stations, mathematical model, travel speed, urban transport.

УДК 656.015

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-34-41

ВЫЯВЛЕНИЕ СКОРОСТНОГО ПОТЕНЦИАЛА В РАЗРЕЗЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАМВАЙНОГО ДВИЖЕНИЯ

д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ

*(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск;
Белорусский национальный технический университет, Минск;
Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Минск)
А.А. КУСТЕНКО*

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Представлен коэффициент использования скоростного режима (КИСР) как критерий оценки эффективности трамвайного движения. Проанализированы ограничения существующих методов оценки: фрагментарность, статичность и недостаточная детализация скоростных характеристик. Разработана математическая модель расчета с учетом технических, инфраструктурных и эксплуатационных факторов. Показаны преимущества: нормированность показателя, выявление резервов эффективности, возможность диагностики узких мест. Практическое применение КИСР открывает новые возможности оптимизации трамвайных систем.

Ключевые слова: *трамвайный транспорт, КИСР, эффективность движения, скоростные характеристики, оптимизация движения, математическое моделирование, транспортное планирование, критерии оценки, городской транспорт, дорожное движение.*

Введение. Трамвайный транспорт находится в периоде активного развития в городах по всему миру, становясь важным элементом устойчивой городской мобильности. Однако эффективная интеграция трамвайных систем в существующую транспортную инфраструктуру требует точных инструментов оценки их функционирования.

Существующие критерии оценки эффективности трамвайного движения, такие как средняя и коммерческая скорость, имеют значимые ограничения. Они не позволяют выявить конкретные узкие места системы, оценить степень использования технического потенциала подвижного состава и инфраструктуры, а также не обеспечивают объективную основу для сравнения различных участков маршрутной сети.

Актуальность разработки новых подходов к оценке эффективности обусловлена необходимостью оптимизации существующих трамвайных систем и обоснования инвестиций в их развитие. Особую важность приобретает создание критериев, которые позволят количественно оценить резервы повышения эффективности и определить приоритетные направления модернизации.

Целью данного исследования является разработка коэффициента использования скоростного режима (КИСР) как инновационного критерия оценки эффективности трамвайного движения, устраняющего недостатки традиционных подходов и обеспечивающего объективную основу для оптимизации транспортных систем.

Основная часть. Современная практика оценки эффективности трамвайного движения в контексте дорожного движения базируется на нескольких группах критериев, каждая из которых отражает различные аспекты функционирования системы [1; 2].

«Пропускные» критерии составляют первую и наиболее очевидную группу показателей. Они включают в себя оценку влияния трамвайного движения на общую пропускную способность улично-дорожной сети. Основным показателем здесь выступает коэффициент снижения пропускной способности, который определяется как отношение разности между базовой пропускной способностью дороги без трамвая и фактической пропускной способностью с учетом трамвайного движения к базовой пропускной способности. Этот критерий позволяет количественно оценить «стоимость» трамвайного движения в терминах потерянной пропускной способности для автомобильного транспорта [1; 3; 4].

Временные критерии фокусируются на анализе временных характеристик движения как самих трамваев, так и других участников дорожного движения. Сюда входят показатели задержек на пересечениях, время ожидания на светофорах, продолжительность конфликтных ситуаций и пр. [5-7]. Особое внимание уделяется анализу временных потерь, возникающих в результате взаимодействия трамваев с автомобильным потоком.

Пространственные критерии оценивают эффективность использования дорожного пространства. К ним относятся показатели плотности размещения трамвайной инфраструктуры, коэффициенты использования проезжей части, анализ геометрических параметров трамвайных путей и их влияние на организацию движения других транспортных средств [8; 9].

Безопасностные критерии анализируют влияние трамвайного движения на общий уровень безопасности дорожного движения [5], т.е. статистику дорожно-транспортных происшествий с участием трамваев, анализ конфликтных точек, оценку рисков для различных категорий участников движения.

Экологические критерии в контексте дорожного движения рассматривают влияние трамвайных систем на общую экологическую обстановку в транспортных коридорах, включая изменения в структуре выбросов, уровне шума, вибрационного воздействия [6; 10–12].

Развитие методологии оценки эффективности трамвайного движения привело к формированию интегральных подходов, которые пытаются объединить различные группы критериев в единую систему оценки. Наиболее распространенными являются методы многокритериального анализа, такие как метод анализа иерархий (МАИ), метод ELECTRE, метод TOPSIS.

Однако практическое применение интегральных методов сталкивается с рядом принципиальных трудностей. Во-первых, различные критерии имеют разную размерность и не всегда поддаются прямому сравнению. Во-вторых, весовые коэффициенты, используемые для агрегирования различных показателей, часто носят субъективный характер и могут значительно варьироваться в зависимости от приоритетов различных заинтересованных сторон.

Анализ современной практики оценки эффективности трамвайного движения выявляет ряд принципиальных проблем, которые ограничивают применимость существующих критериев [13]:

1. Фрагментарность оценки. Большинство существующих критериев фокусируются на отдельных аспектах функционирования трамвайных систем, не обеспечивая целостного представления об их эффективности в контексте дорожного движения. Например, критерии пропускной способности могут показывать высокую эффективность системы, в то время как анализ временных характеристик выявляет значительные задержки для пассажиров.

2. Статичность критериев. Многие традиционные показатели основаны на усредненных значениях и не учитывают динамический характер дорожного движения. Это особенно критично для трамвайных систем, эффективность которых может существенно варьироваться в зависимости от времени суток, дня недели, сезонных факторов.

3. Недостаточная детализация скоростных характеристик в существующих подходах не позволяет выявить резервы повышения эффективности. Традиционные показатели, такие как средняя скорость или скорость сообщения, дают общее представление о функционировании системы, но не раскрывают причины снижения эффективности и не указывают на конкретные направления оптимизации.

Скорость движения трамвая является одним из наиболее важных и информативных критериев оценки эффективности трамвайного движения в контексте дорожного движения. Этот показатель интегрирует в себе влияние множественных факторов: технических характеристик подвижного состава, состояния инфраструктуры, организации дорожного движения, взаимодействия с другими участниками движения.

Скоростные характеристики трамвайного движения можно классифицировать по нескольким основаниям. По способу измерения различают мгновенную скорость, среднюю скорость на участке, скорость сообщения. По условиям движения выделяют скорость свободного движения, скорость в транспортном потоке, скорость при приоритетном движении [14].

Мгновенная скорость $V(t)$ характеризует скорость движения трамвая в конкретный момент времени и определяется как первая производная от пути по времени:

$$V(t) = \frac{ds}{dt}, \text{ м/с,}$$

где s – пройденный путь, м;
 t – время, с.

Средняя скорость на участке рассчитывается как отношение длины участка к времени его прохождения:

$$V_{cp} = \frac{L_y}{t_y}, \text{ м/с,}$$

где L_y – длина участка, м;
 t_y – время прохождения участка, с.

Скорость сообщения учитывает все остановки и задержки в процессе движения:

$$V_c = \frac{L_{обц}}{(t_{дв} + t_{ост} + t_3)}, \text{ м/с,}$$

где $L_{обц}$ – общая длина маршрута, м;
 $t_{дв}$ – время движения, с;
 $t_{ост}$ – время остановок, с;
 t_3 – время задержек, с.

Скоростные характеристики трамвайного движения формируются под воздействием комплекса взаимосвязанных факторов, которые можно разделить на несколько групп [1; 5]:

1. Технические факторы включают характеристики подвижного состава (мощность тяговых двигателей, тормозные характеристики, аэродинамические свойства), состояние рельсового пути (профиль, кривизна, состояние рельсов), системы энергоснабжения (напряжение в контактной сети, потери энергии).

2. Инфраструктурные факторы охватывают геометрические параметры трассы (продольные и поперечные уклоны, радиусы кривых), расположение остановочных пунктов, организацию пересечений с автомобильными дорогами, наличие выделенных полос для трамвайного движения.

3. Эксплуатационные факторы определяются интенсивностью движения, интервалами между трамваями, квалификацией водителей, системой управления движением, приоритетом на пересечениях.

4. Внешние факторы связаны с взаимодействием с другими участниками дорожного движения, погодными условиями, временными ограничениями (ремонтные работы, массовые мероприятия).

Традиционные показатели скорости, такие как средняя и скорость сообщения, при всей своей важности имеют ряд принципиальных ограничений, которые снижают их информативность для целей оптимизации трамвайного движения:

1. Усреднение данных приводит к потере информации о вариабельности скоростных характеристик. Два маршрута с одинаковой средней скоростью могут иметь кардинально разные профили движения: один с равномерным движением, другой с чередованием периодов высокой скорости и полных остановок.

2. Отсутствие связи с потенциалом системы не позволяет оценить, насколько эффективно используются технические возможности трамвайного подвижного состава и инфраструктуры. Коммерческая скорость 20 км/ч может быть отличным показателем для старой системы с ограниченными техническими характеристиками и неудовлетворительным для современной системы с высокими техническими возможностями.

3. Невозможность выявления узких мест в существующих показателях не позволяет определить конкретные участки или факторы, которые в наибольшей степени ограничивают скорость движения и, следовательно, требуют первоочередного внимания при оптимизации системы.

Коэффициент использования скоростного режима (КИСР) представляет собой критерий оценки эффективности трамвайного движения, который устраняет основные недостатки традиционных скоростных показателей. Этот коэффициент определяется как отношение фактической скорости сообщения трамвая между двумя остановочными пунктами к максимально возможной скорости, которую мог бы развить трамвай на данном участке при отсутствии остановок и задержек.

Концептуально КИСР отражает степень реализации скоростного потенциала трамвайной системы и позволяет оценить эффективность использования технических возможностей подвижного состава и инфраструктуры в конкретных условиях эксплуатации.

В своей простейшей форме коэффициент использования скоростного режима может быть записан как

$$K_{иср} = \frac{V_{\phi}}{V_{\max}},$$

где V_{ϕ} – фактическая скорость сообщения между остановочными пунктами;

V_{\max} – максимально возможная скорость на данном участке

Однако такая формулировка является чрезмерно упрощенной и не учитывает сложность реальных условий движения трамвая. Для практического применения необходима более детализированная математическая модель.

Для корректного расчета КИСР необходимо учесть множественные факторы, влияющие как на фактическую, так и на потенциальную скорость движения. Развернутая формула коэффициента имеет следующий вид:

$$K_{иср} = \frac{T_{ид}}{T_{\phi}},$$

где T_{ϕ} – фактическое время прохождения участка;

$T_{ид}$ – идеальное время прохождения участка при оптимальных условиях.

Определение идеального времени движения $T_{ид}$ представляет собой сложную задачу, требующую учета технических характеристик трамвая, геометрических параметров пути и ограничений безопасности.

Идеальное время движения рассчитывается на основе оптимального профиля скорости, который включает три фазы: разгон, движение с постоянной скоростью и торможение.

Фаза разгона. Время разгона до максимальной скорости определяется тяговыми характеристиками трамвая:

$$t_1 = \frac{V_{\max}}{a_p}, \text{ с.}$$

Путь, пройденный за время разгона:

$$S_1 = \frac{V_{\max}^2}{2 \cdot a_p}, \text{ м,}$$

где a_p – ускорение при разгоне, м/с².

Фаза торможения. Аналогично, время торможения

$$t_3 = \frac{V_{\max}}{a_3}, \text{ с.}$$

Путь торможения:

$$S_3 = \frac{V_{\max}^2}{2 \cdot a_3}, \text{ м,}$$

где a_3 – замедление при торможении, м/с².

Фаза равномерного движения. Если длина участка L превышает сумму путей разгона и торможения ($L_{\text{общ}} > S_1 + S_3$), то

$$S_2 = L_{\text{общ}} - S_1 - S_3, \text{ м,}$$

$$t_2 = \frac{S_2}{V_{\max}}, \text{ с.}$$

Общее идеальное время:

$$T_{\text{ид}} = t_1 + t_2 + t_3, \text{ с.}$$

Если длина участка недостаточна для достижения максимальной скорости ($L \leq S_1 + S_3$), то максимальная достижимая скорость определяется из условия

$$V_{\text{дос}} = \sqrt{\frac{L_{\text{общ}} \cdot a_p \cdot a_3}{a_p + a_3}}, \text{ м/с.}$$

При определении максимально возможной скорости V_{\max} необходимо учитывать не только технические характеристики трамвая, но и ограничения, накладываемые инфраструктурой и условиями безопасности.

Технические ограничения подвижного состава:

$$V_{\text{техн}} = \min(V_{\text{конст}}, V_{\text{тяг}}, V_{\text{торм}}), \text{ м/с,}$$

где $V_{\text{конст}}$ – конструкционная скорость трамвая, м/с;

$V_{\text{тяг}}$ – максимальная скорость, ограниченная тяговыми характеристиками, м/с;

$V_{\text{торм}}$ – максимальная скорость, обеспечивающая безопасное торможение, м/с.

Инфраструктурные ограничения:

$$V_{\text{инфр}} = \min(V_{\text{рад}}, V_{\text{укл}}, V_{\text{путь}}), \text{ м/с,}$$

где $V_{\text{рад}}$ – скорость, ограниченная минимальным радиусом кривых на участке, м/с;

$V_{\text{укл}}$ – скорость, ограниченная максимальным продольным уклоном, м/с;

$V_{\text{путь}}$ – скорость, ограниченная состоянием рельсового пути, м/с.

Эксплуатационные ограничения:

$$V_{\text{эсп}} = \min(V_{\text{без}}, V_{\text{комф}}, V_{\text{регл}}), \text{ м/с,}$$

где $V_{\text{без}}$ – скорость, обеспечивающая безопасность движения, м/с;

$V_{\text{комф}}$ – скорость, обеспечивающая комфорт пассажиров, м/с;

$V_{\text{регл}}$ – скорость, установленная эксплуатационными регламентами, м/с.

Итоговая максимальная скорость определяется как

$$V_{\max} = \min(V_{\text{техн}}, V_{\text{инфр}}, V_{\text{эсп}}), \text{ м/с.}$$

Базовая формула КИСП может быть модифицирована для учета специфических условий эксплуатации и целей анализа.

КИСП с учетом весовых коэффициентов. Для участков с различной значимостью в общей структуре маршрута может применяться взвешенная формула

$$K_{иср} = \frac{\sum_{i=1}^{ny} (w_i \cdot K_{исрi})}{\sum_{i=1}^{ny} w_i},$$

где w_i – весовой коэффициент i -го участка;
 $K_{исрi}$ – коэффициент для i -го участка.

КИСП с учетом временной динамики представляет собой адаптивную модификацию показателя, позволяющую анализировать изменение эффективности во времени с использованием методов экспоненциального сглаживания.

Формула обеспечивает плавное отслеживание тенденций изменения эффективности с возможностью настройки чувствительности к новым данным через коэффициент сглаживания α :

$$K_{иср}(t) = \alpha \cdot K_{иср.тек} + (1 - \alpha) \cdot K_{иср.пред},$$

где α – коэффициент сглаживания ($0 < \alpha < 1$).

Коэффициент сглаживания α определяет степень влияния текущих измерений на сглаженное значение КИСП. При α , близком к 1 (например, $\alpha = 0,9$), система быстро реагирует на изменения, что подходит для оперативного мониторинга и быстрого выявления отклонений от нормального режима работы. При α , близком к 0 (например, $\alpha = 0,1$), система медленно реагирует на изменения, что обеспечивает стабильность показателя и подходит для долгосрочного анализа трендов.

Выбор оптимального значения коэффициента сглаживания зависит от целей анализа и характеристик данных. Для систем с высокой вариабельностью КИСП рекомендуется использовать меньшие значения α (0,1–0,3) для снижения влияния случайных колебаний. Для стабильных систем с редкими значительными изменениями целесообразно использовать большие значения α (0,7–0,9) для быстрого выявления отклонений.

Математическое обоснование выбора коэффициента сглаживания может основываться на минимизации среднеквадратичной ошибки прогноза:

$$\alpha_{opt} = \arg \min \sum (K_{иср.факт}(t) - K_{иср.прог}(t))^2,$$

где $\arg \min$ – значение переменной (в данном случае α), при котором функция достигает минимального значения;

$\sum (K_{иср.факт}(t) - K_{иср.прог}(t))^2$ – сумма квадратов ошибок прогноза.

Данный подход позволяет определить оптимальное значение α для конкретной трамвайной системы на основе статистических данных.

Практическое применение динамического КИСП включает создание адаптивных систем мониторинга, способных автоматически корректировать пороговые значения и критерии оценки эффективности в зависимости от текущих условий эксплуатации. Система может автоматически увеличивать чувствительность мониторинга при обнаружении тенденции к снижению эффективности или, наоборот, снижать чувствительность в периоды стабильной работы.

КИСП с учетом пассажиропотока представляет собой модификацию базового показателя, учитывающую влияние загрузки трамвая на его скоростные характеристики:

$$K_{иср.заг} = K_{иср.баз} \cdot (1 - \beta \cdot \gamma_3),$$

где β – коэффициент влияния загрузки;
 γ_3 – коэффициент загрузки вагона.

Коэффициент загрузки вагона определяется как отношение фактического количества пассажиров к номинальной вместимости:

$$\gamma_3 = \frac{q_{ф}}{q_{н}},$$

где $q_{ф}$ – фактическое количество пассажиров, пасс.;

$q_{н}$ – номинальная вместимость вагона, пасс.

Значения коэффициента загрузки могут превышать единицу в случае переполнения вагона, что характерно для часов пик в крупных городах.

Коэффициент влияния загрузки β определяется экспериментально для каждого типа трамвая и может варьироваться в зависимости от конструктивных особенностей вагонов. Для современных низкопольных трамваев значения β можно допустить в диапазоне 0,15–0,25, что означает снижение КИСП на 15–25% при полной загрузке вагона. Для старых высокопольных трамваев значения β могут достигать 0,35–0,45 из-за менее эффективной планировки салона и более медленного процесса посадки-высадки пассажиров [15].

Физическое обоснование влияния загрузки на КИСП связано с несколькими факторами. Увеличение массы транспортного средства при росте пассажиропотока приводит к снижению ускорения и увеличению тормозного пути, что непосредственно влияет на скоростные характеристики. Время стоянок на остановках увеличивается пропорционально количеству пассажиров, осуществляющих посадку и высадку. Переполнение вагона может приводить к задержкам закрытия дверей и дополнительным остановкам для регулирования пассажиропотока. Это не может сказаться на стоимости услуги [16].

Значения коэффициента использования скоростного режима могут интерпретироваться следующим образом:

- КИСП = 1,0 – идеальные условия эксплуатации, полное использование скоростного потенциала системы. На практике такие значения недостижимы из-за неизбежных эксплуатационных ограничений.
- КИСП = 0,8–0,9 – отличные условия эксплуатации, высокоэффективное использование скоростного потенциала.
- КИСП = 0,6–0,8 – хорошие условия эксплуатации, удовлетворительное использование скоростного потенциала.
- КИСП = 0,4–0,6 – удовлетворительные условия эксплуатации, значительные резервы повышения эффективности.
- КИСП < 0,4 – неудовлетворительные условия эксплуатации, критически низкое использование скоростного потенциала. Требуется немедленных мер по оптимизации системы.

Коэффициент использования скоростного режима может применяться для решения широкого спектра задач планирования и оптимизации трамвайного движения:

- диагностики узких мест: анализ значений КИСП по отдельным участкам маршрута позволяет выявить участки с наиболее низкой эффективностью использования скоростного потенциала и сосредоточить усилия по оптимизации именно на этих участках;
- сравнительного анализа маршрутов: КИСП обеспечивает объективную основу для сравнения эффективности различных маршрутов, независимо от их технических характеристик и условий эксплуатации;
- оценки эффективности мероприятий: изменение значений КИСП до и после реализации мероприятий по оптимизации (введение приоритета на светофорах, выделение полос движения, модернизация подвижного состава) позволяет количественно оценить их эффективность;
- планирования развития системы: КИСП может использоваться для прогнозирования эффективности планируемых трамвайных линий и оптимизации их параметров на стадии проектирования.

Преимущества КИСП перед традиционными критериями:

1. Нормированность показателя.

Одним из ключевых преимуществ КИСП является его нормированность. Значения коэффициента всегда находятся в диапазоне от 0 до 1, что обеспечивает:

- универсальность сравнений – возможность сравнения участков с различными техническими характеристиками;
- интуитивную понятность – значение 0,8 означает использование 80% скоростного потенциала;
- простоту агрегирования – возможность вычисления средних значений без потери смысла.

2. Выявление резервов эффективности.

КИСП позволяет количественно оценить неиспользованный потенциал системы:

$$\%V_{рез} = (1 - K_{иср}) \cdot 100\%.$$

В отличие от статических показателей средней скорости, КИСП может рассчитываться для различных временных интервалов и условий:

- почасовой анализ – выявление периодов с низкой эффективностью;
- сезонный анализ – учет влияния погодных условий;
- ситуационный анализ – оценка влияния различных факторов.

Направления развития:

1. Интеграция с системами искусственного интеллекта может обеспечить автоматический расчет оптимальных профилей скорости с учетом текущих условий движения и прогнозирования изменений.
2. Развитие концепции адаптивного КИСП предполагает динамическое изменение целевых значений коэффициента в зависимости от условий эксплуатации и приоритетов системы.
3. Интеграция с концепцией «умного города» позволит использовать КИСП как один из ключевых показателей эффективности городской мобильности в целом.

Заключение. Коэффициент использования скоростного режима представляет собой инновационный и высокоинформативный критерий оценки эффективности трамвайного движения в контексте дорожного движения. Его математическая основа, базирующаяся на сравнении фактических и потенциальных скоростных характеристик, обеспечивает объективную оценку эффективности использования технических возможностей трамвайных систем.

Практическое применение КИСР открывает новые возможности для оптимизации трамвайного движения, позволяя выявлять узкие места, оценивать эффективность мероприятий по улучшению и устанавливать обоснованные целевые показатели развития системы. Нормированный характер показателя обеспечивает универсальность его применения для различных типов трамвайных систем и условий эксплуатации.

Дальнейшее развитие концепции КИСР в направлении интеграции с современными информационными технологиями и системами управления городским транспортом может существенно повысить эффективность планирования и эксплуатации трамвайных систем, способствуя их более широкому внедрению в качестве экологически чистого и эффективного вида городского транспорта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вучик В.Р. Транспорт в городах, удобных для жизни / пер. с англ. А. Калинина; под науч. ред. М. Блинкина. – М.: Территория будущего, 2011. – 576 с.
2. Врубель Ю.А. Потери в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2003. – 380 с.
3. Врубель Ю.А., Капский Д.В. Опасности в дорожном движении. – М.: Новое знание, 2013. – 244 с.
4. Врубель Ю.А., Капский Д.В. Водителю о дорожном движении. – 3-е изд., дораб. – Минск: БНТУ, 2010. – 139 с.
5. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 243 с.
6. Капский Д.В. Экологические потери в дорожном движении // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2014. – № 3(63). – С. 163–167.
7. Чикишев Е.М., Капский Д.В., Семченков С.С. Оценка влияния транспортных и природно-климатических факторов на уровень расхода электроэнергии электробусов в условиях городской среды // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 48–59. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-23-1-48-59
8. Капский Д.В. Транспорт в планировке городов. – Минск: БНТУ, 2023. – 571 с.
9. Капский Д.В. Роль организации дорожного движения в транспортной системе города // Транспорт и сервис. – 2014. – № 2. – С. 47–51.
10. Анализ развития различных видов городского электрического транспорта в Полоцке и Новополоцке / Д.В. Капский, В.Н. Кузьменко, А.С. Красильникова и др. // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 2. – С. 150–157. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157
11. Ярошевич В.К., Седюкевич В.Н., Капский Д.В. Оценка экологических потерь при организации автомобильных перевозок // Вестник БНТУ. – 2006. – № 5. – С. 61–62.
12. Кухаренок Г.М., Капский Д.В. Разработка методики определения экологических потерь в дорожном движении // Вестник БНТУ. – 2005. – № 6. – С. 58–61.
13. Капский Д.В. Повышение качества дорожного движения в городах // Транспортные системы мегаполисов. Проблемы и пути решения: тр. Междунар. науч.-практ. конф. / Харьков (11–12 окт. 2011 г.) / редкол.: А.Н. Туренко [и др.]. – Харьков, 2011. – С. 20–26.
14. Сафронов Э.А., Сафронов К.Э. Инновационные методы повышения эффективности транспортных систем городов // Вестник МАДИ. – № 3(26). – 2011. – С. 7–12.
15. Минко И.С. Анализ деятельности производственных систем: учеб.-метод. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО: ИХиБТ, 2014. – 45 с.
16. Изменение параметров городской транспортной системы при введении платы с владельцев автомобилей за использование улично-дорожной сети и варьировании стоимости проезда в общественном транспорте / Д.А. Захаров, Е.М. Чикишев, Д.В. Капский и др. // Наука и техника. – 2024. – Т. 23, № 4. – С. 336–344. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-4-336-344

REFERENCES

1. Vuchik, V. R. (2011). *Transport v gorodakh, udobnykh dlya zhizni* (A. Kalinin (Trans.); M. Blinkin (Ed.)). Moscow: Territoriya budushchego. (In Russ.).
2. Vrubel', Yu.A. (2003). *Poteri v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
3. Vrubel', Yu.A. & Kapskii, D.V. (2013). *Opasnosti v dorozhnom dvizhenii*. Moscow: Novoe znanie. (In Russ.).
4. Vrubel', Yu.A. & Kapskii, D.V. (2010). *Voditelyu o dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
5. Kapskii, D.V. (2008). *Prognozirovaniye aviariynosti v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
6. Kapskii, D.V. (2014). *Ekologicheskie poteri v dorozhnom dvizhenii* [Environmental losses in road traffic]. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov], 3(63), 163–167. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Chikishev, E.M., Kapskii, D.V. & Semchenkov, S.S. (2023). *Otsenka vliyaniya transportnykh i prirodno-klimaticheskikh faktorov na uroven' raskhoda elektroenergii elektrobusev v usloviyakh gorodskoi sredy* [Assessment of Transport, Natural and Climatic Factors Influence on the Level of Electric Buses Energy Consumption in Urban Environment.]. *Nauka i tekhnika* [Science & Technique], 22(1), 48–59. DOI: 10.21122/2227-1031-2023-23-1-48-59 (In Russ., in Engl.).
8. Kapskii, D.V. (2023). *Transport v planirovke gorodov*. Minsk: BNTU. (In Russ.).

9. Kapskii, D.V. (2014). Rol' organizatsii dorozhnogo dvizheniya v transportnoi sisteme goroda [Role of the organization of road traffic in transport system of the city]. *Transport i servis [Transport & service]*, (2), 47–51. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Kapskii, D.B., Kuz'menko, V.N., Krasil'nikova, A.S., Semchenkov, S.S., Kot, E.N. & Larin, O.N. (2022). Analiz razvitiya razlichnykh vidov gorodskogo elektricheskogo transporta v Polotske i Novopolotske [Analysis of Development of Various Types of Urban Electric Transport in Polotsk and Novopolotsk]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 21(2), 150–157. DOI 10.21122/2227-1031-2022-21-2-150-157 (In Russ., in Engl.).
11. Yaroshevich, V.K., Sedyukevich, V.N. & Kapskii, D.V. (2006). Otsenka ekologicheskikh poter' pri organizatsii avtomobil'nykh perezovok. *Vestnik BNTU*, (5), 61–62. (In Russ.).
12. Kukharenok, G.M. & Kapskii, D.V. (2005). Razrabotka metodiki opredeleniya ekologicheskikh poter' v dorozhnom dvizhenii. *Vestnik BNTU*, (5), 58–61. (In Russ.).
13. Kapskii, D.V. (2011). Povyshenie kachestva dorozhnogo dvizheniya v gorodakh. *Transportnye sistemy megapolisov. Problemy i puti resheniya: tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / Khar'kov (11–12 okt. 2011 g.)* (20–26). Khar'kov: Khar'kov. nats. avtomobil'nodorozhnyi un-t. (In Russ.).
14. Safronov, E.A. & Safronov, K.E. (2011). Innovatsionnye metody povysheniya effektivnosti transportnykh sistem gorodov [Innovative methods of increase of efficiency of transport researches]. *Vestnik MADI [MADI Bulletin]*, 3(26), 7–12. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Minko, I.S. (2014). *Analiz deyatel'nosti proizvodstvennykh sistem*. Saint Petersburg: NIU ITMO: IKhiBT. (In Russ.).
16. Zakharov, D.A., Chikishev, E.M., Kapskii, D.V. & Skirkovskii, S.V. (2024). Izmenenie parametrov gorodskoi transportnoi sistemy pri vvedenii platy s vladel'tsev avtomobilei za ispol'zovanie ulichno-dorozhnoi seti i var'irovaniu stoimosti proezda v obshchestvennom transporte [Changing the Parameters of the Urban Transport System with Introduction of Fees from Car Owners for Using the Road Network and Variations in Public Transport Fare]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 23(4), 336–344. DOI: 10.21122/2227-1031-2024-23-4-336-344 (In Russ., in Engl.).

Поступила 11.06.2025

IDENTIFICATION OF SPEED POTENTIAL IN THE CONTEXT OF TRAM TRAFFIC EFFICIENCY

D. KAPSKI

(Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk;

Belarusian National Technical University, Minsk;

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus, Minsk)

A. KUSTENKA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article presents such a criterion for evaluating tram traffic efficiency as the speed regime utilization coefficient (SRUC). The limitations of existing evaluation methods are analyzed: fragmentation, static nature, and insufficient detail of speed characteristics. A mathematical calculation model has been developed taking into account technical, infrastructural, and operational factors. The advantages are shown: normalized indicator, identification of efficiency reserves, possibility of bottleneck diagnostics. Practical application of SRUC opens new opportunities for tram system optimization.

Keywords: *tram transport, SRUC, traffic efficiency, speed characteristics, traffic optimization, mathematical modeling, transport planning, evaluation criteria, urban transport, road traffic.*

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ГИБКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ДВИЖЕНИЯ МТС НА РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕКРЕСТКАХ

*ЛЮ ЮЙВЭЙ, канд. физ.-мат. наук, доц. Д.С. САРАЖИНСКИЙ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)
д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ
(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск;
Белорусский национальный технический университет, Минск;
Академия управления при Президенте Республики Беларусь, Минск)*

Выполнен анализ существующих методов и технологий, направленных на уменьшение блокировок движения маршрутных пассажирских транспортных средств на регулируемых перекрестках. Разработаны варианты на базе интеллектуальных транспортных систем, гибких алгоритмов управления дорожным движением и современных средств управления светофорным регулированием для уменьшения блокировок маршрутных транспортных средств. Путем имитационного микромоделирования оценена результативность предложенных решений, а также их эффективность.

Ключевые слова: маршрутные транспортные средства, регулируемый перекресток, гибкое регулирование, алгоритмы, управление.

Введение. Главной целью для всех существующих подходов и методов является обеспечение эксплуатационной скорости [1], а также стабильности работы маршрутного пассажирского транспорта, т.е. точное выполнение установленного расписания движения [2]. Наиболее распространенные из них представлены на рисунке 1, среди которых выделенные специальные полосы для движения маршрутного транспорта, смещение выделенной полосы, приоритет маршрутного пассажирского транспорта на регулируемых перекрестках (TSP – Transit Signal Priority), скоростные автобусные линии (BRT – Bus Rapid Transit) и пр.^{1,2,3,4,5,6,7}.

В г. Минске внедряются аналогичные методы организации движения маршрутного пассажирского транспорта, направленные на повышение его эффективности и уменьшение блокировок на дорогах: метод выделения специальных полос для маршрутных транспортных средств, например, на проспекте Независимости; метод смещения выделенной полосы во вторую полосу с образованием кармана для правоповоротных транспортных средств, например, на пересечении улицы Притыцкого – улицы Лещинского – улицы Якубовского. Кроме того, стоит отметить, что для эффективной работы выделенной полосы необходим контроль за соблюдением правил для предотвращения незаконного въезда личного транспорта. Поэтому в Минске используется метод контроля выделенных полос с помощью камер, фиксирующих нарушение правил проезда по полосам, в т.ч. незаконное движение личного транспорта по выделенным полосам для маршрутного транспорта.

Основная часть. Установлены причины блокировки маршрутных транспортных средств (МТС) (рисунок 2).

Основная идея предлагаемых подходов заключается в организации регулируемой зоны, расположенной на определенном удалении от исследуемого перекрестка. Такая зона позволяет эффективно управлять движением, создавая при необходимости возможность останавливать транспортный поток, движущийся по второй полосе. Это обеспечивает безопасное и своевременное перестроение маршрутных транспортных средств, следующих по выделенной полосе, во вторую полосу движения для того, чтобы избежать очереди из правоповоротных транспортных средств и вернуться обратно в выделенную полосу. В результате будут существенно снижаться блокировки маршрутных пассажирских транспортных средств.

¹ Transit Signal Priority [Электронный ресурс] // TSMO WA. – URL: <https://tsmowa.org/category/intelligent-transportation-systems/transit-signal-priority> (дата обращения: 04.06.2025).

² Signal Priority [Электронный ресурс] // Federal Transit Administration. – URL: <https://www.transit.dot.gov/research-innovation/signal-priority> (дата обращения: 04.06.2025).

³ Transit Signal Priority [Электронный ресурс] // RTD Denver. – URL: <https://www.rtd-denver.com/ru/about-rtd/projects/transit-signal-priority> (дата обращения: 04.06.2025).

⁴ Transit Signal Priority [Электронный ресурс] // WeGoTransit. – URL: <https://www.wegotransit.com/projects/transit-signal-priority/> (дата обращения: 04.06.2025).

⁵ Transit Signal Priority [Электронный ресурс] // Greater Portland METRO. – URL: <https://www.gpmetro.org/about-us/projects-initiatives/transit-signal-priority/> (дата обращения: 04.06.2025).

⁶ Transit Advantages and Signal Priority Working Group Report [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.lrl.mn.gov/docs/2024/mandated/240348.pdf> (дата обращения: 04.06.2025).

⁷ The Effect of Transit Signal Priority on Bus Rapid Transit Headway Adherence [Электронный ресурс] // Findings. – URL: <https://findingspress.org/article/24499-the-effect-of-transit-signal-priority-on-bus-rapid-transit-headway-adherence> (дата обращения: 04.06.2025).

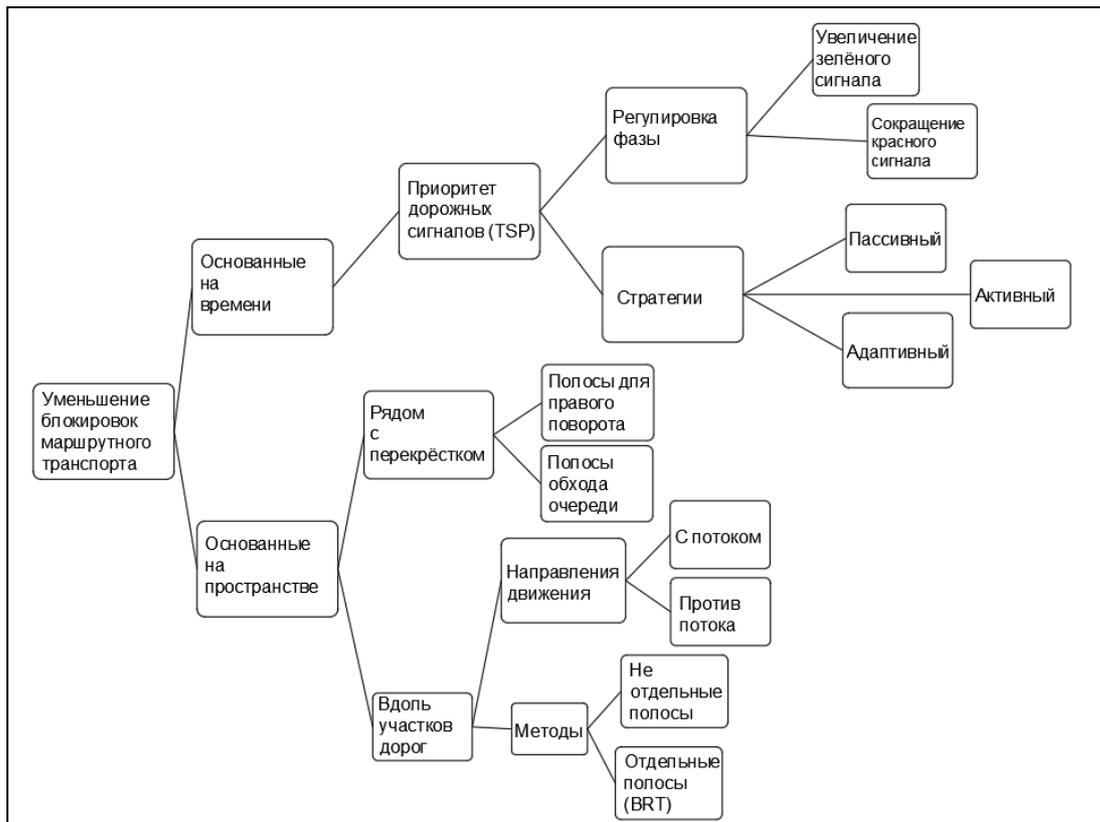


Рисунок 1. – Схема существующих методов уменьшения блокировок маршрутного пассажирского транспорта

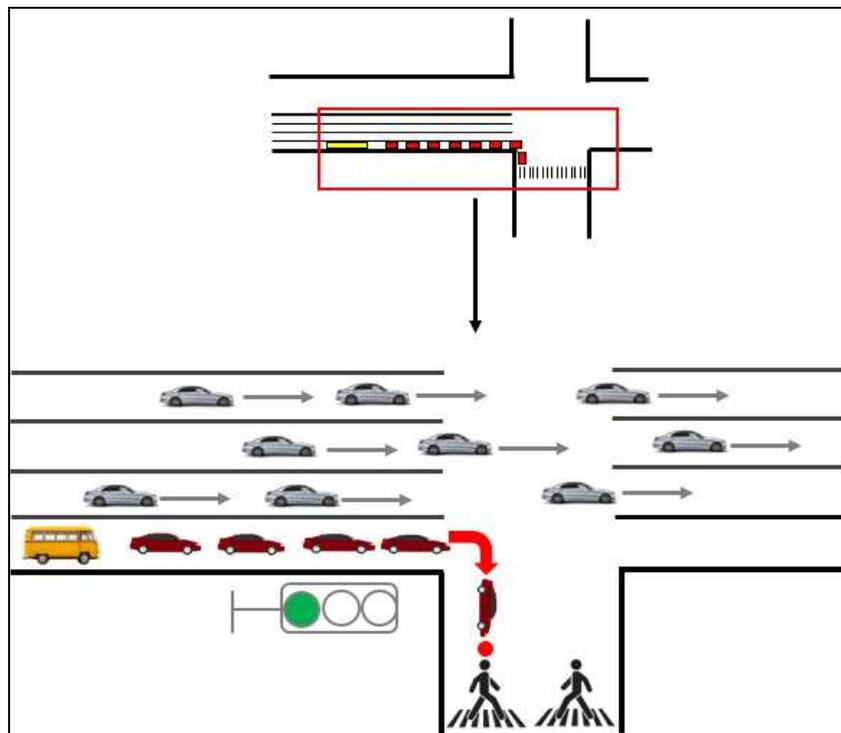


Рисунок 2. – Причина блокировки маршрутных пассажирских транспортных средств

Реализация обоих вариантов базируется на том, что водитель маршрутного транспортного средства, заметив перед собой очередь транспортных средств, выполняющих правый поворот, может подать запрос на обслуживание дорожному контроллеру, что в свою очередь активирует диаграмму светофорного регулирования, обеспечивающую остановку транзитного потока по второй полосе и беспрепятственный пропуск маршрутного пассажирского транспортного средства. В простейшем (первом варианте) это выглядит, как показано на рисунках 3 и 4

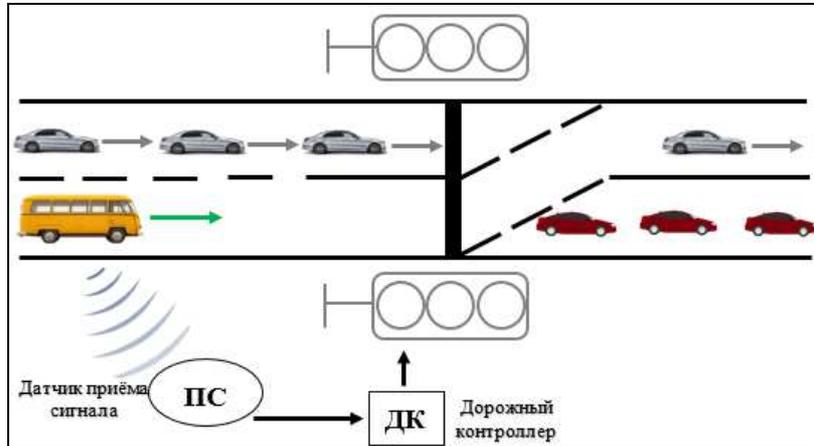


Рисунок 3. – Запрос на обслуживание из салона маршрутного пассажирского транспортного средства

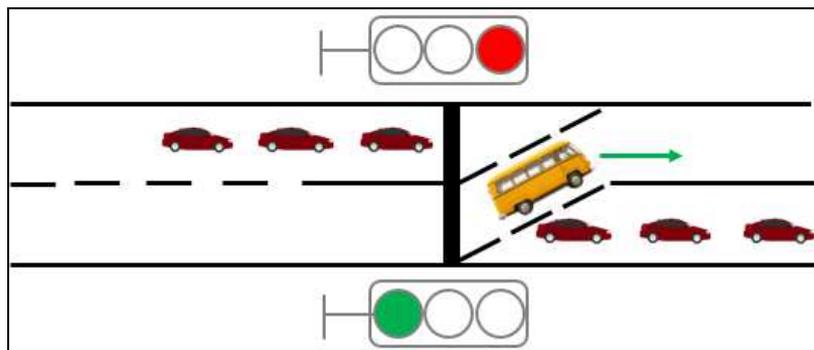


Рисунок 4. – Проезд маршрутного пассажирского транспортного средства после активации цикла диаграммы светофорного регулирования

После того как автобусы и троллейбусы завершают проезд через регулируемую зону, по окончании одного активного цикла регулирования, светофоры возвращаются к выключенному состоянию. Таким образом алгоритм работы можно представить в следующем виде – рисунок 5.

Соответствующая диаграмма одного активного цикла представлена на рисунке 6.

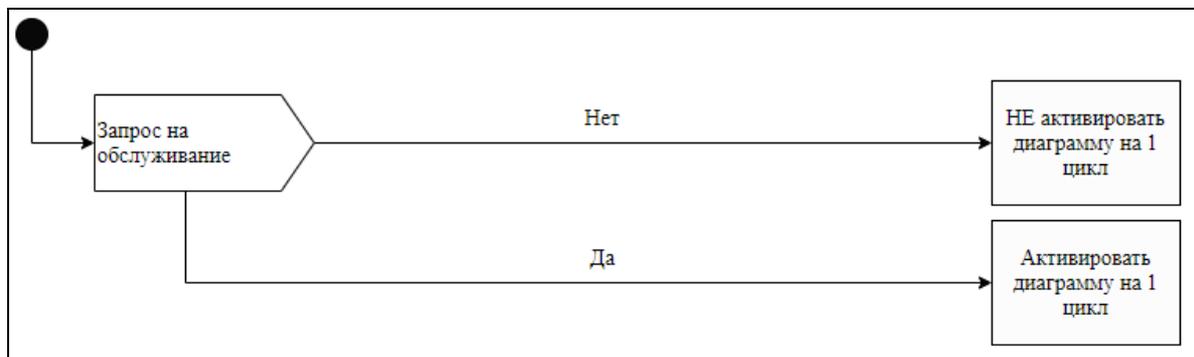


Рисунок 5. – Алгоритм работы первого варианта реализации

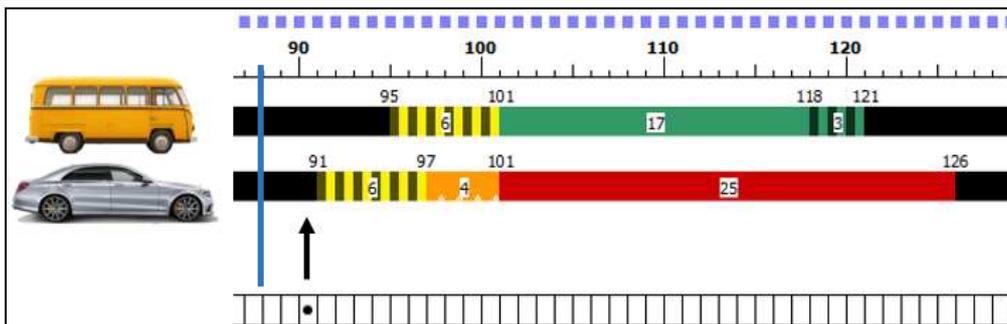


Рисунок 6. – Диаграмма светофорного регулирования (границы активного цикла выделены синим цветом)

Данный алгоритм может быть реализован на дорожных контроллерах типа «СИДК», которые поддерживают желтый мигающий сигнал в программах и обеспечивают организацию гибкого регулирования движения. Для этого достаточно организации тактов и переходов между ними согласно рисункам 7 и 8.

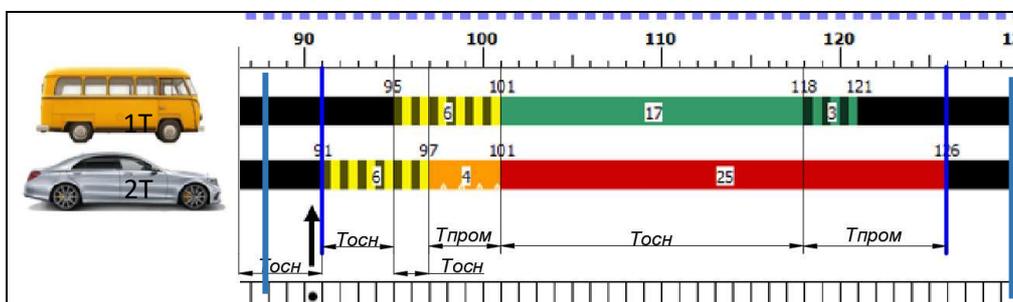


Рисунок 7. – Потактовое представление диаграммы светофорного регулирования на один цикл

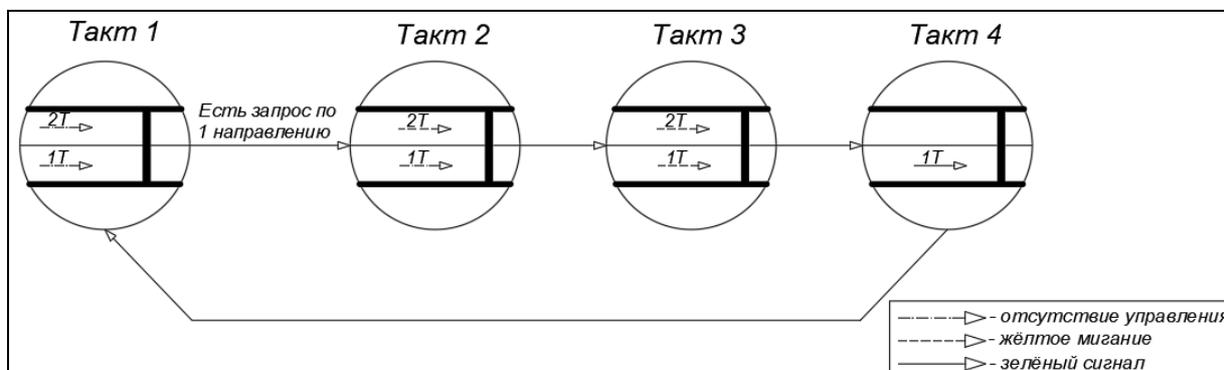


Рисунок 8. – Потактовое переключение

Но в рассмотренном варианте есть недостаток – проблема с выбором длительности зеленого сигнала. Например, после включения светофора на зеленый сигнал проезжает всего один автобус, а время зеленого сигнала еще не закончилось, поскольку предусматривало проезд двух, т.е. присутствует неиспользуемое время, которое можно сократить. Поэтому был рассмотрен второй вариант реализации проектного решения.

Реализация второго варианта практически схожа с первым вариантом реализации, представленным выше. Однако если после того, как был получен первый запрос на обслуживание, например, от первого автобуса, в течение определенного времени не поступает никаких новых запросов, скажем, от второго или третьего автобуса, то в контроллер поступает информация о наличии разрыва в потоке⁸. В ответ дорожный контроллер автоматически сокращает длительность зеленого сигнала до минимума (рисунок 9).

⁸ Разрыв в потоке – ситуация, когда после проезда первого автомобиля следующее транспортное средство появляется с временным зазором (Gap – временной зазор), превышающим установленный порог, заданный для данного датчика.

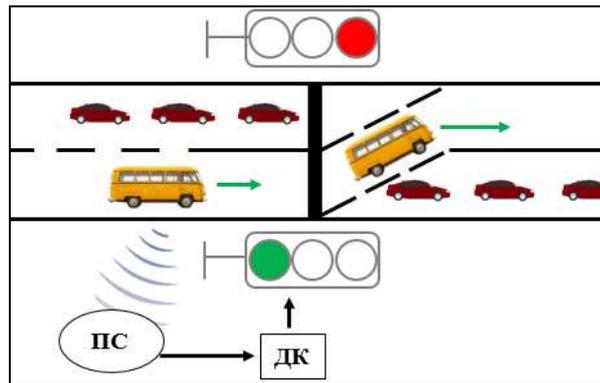


Рисунок 9. – Управление в ситуации, когда есть 2 запроса на обслуживание (без сокращения времени)

Для осуществления такого решения в проекте предполагается использование (помимо датчика запроса на обслуживание) дополнительного логического датчика⁹ – датчика разрыва в потоке, который фиксирует мгновенное состояние разрыва (т.е. не запоминает единожды уже обнаруженный разрыв). В качестве порогового значения для обнаружения разрыва в потоке предлагается установить 5 с, поскольку этого времени достаточно, чтобы автобус успел доехать от расположенного поблизости остановочного пункта до регулируемой зоны.

Таким образом, алгоритм работы можно представить в следующем виде (рисунок 10).

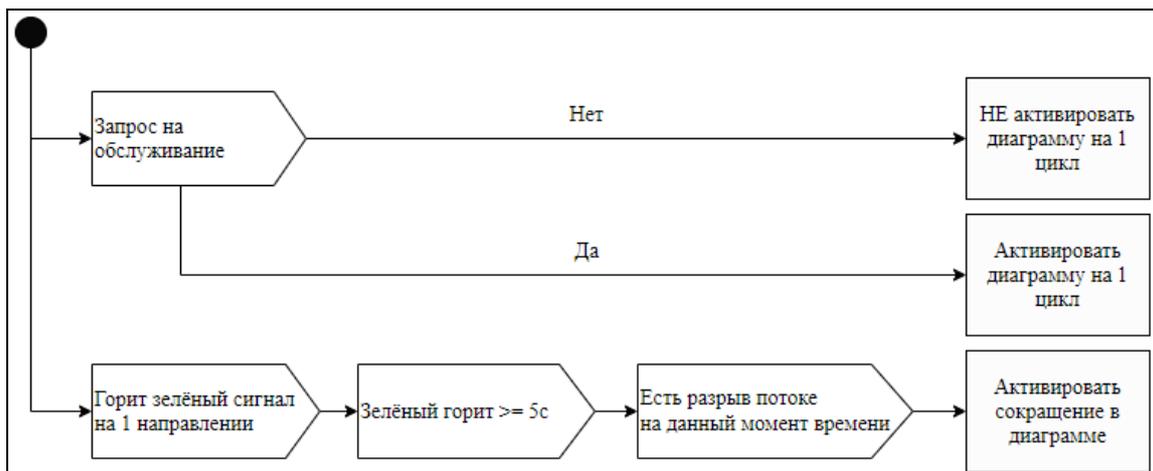


Рисунок 10. – Алгоритм работы второго варианта реализации

Условие «Зеленый горит >= 5 секунд» используется, чтобы предоставить второму автобусу возможность подать запрос на продолжение зеленого сигнала, когда первый автобус еще не завершил проезд.

Соответствующая диаграмма одного цикла представлена на рисунке 11.

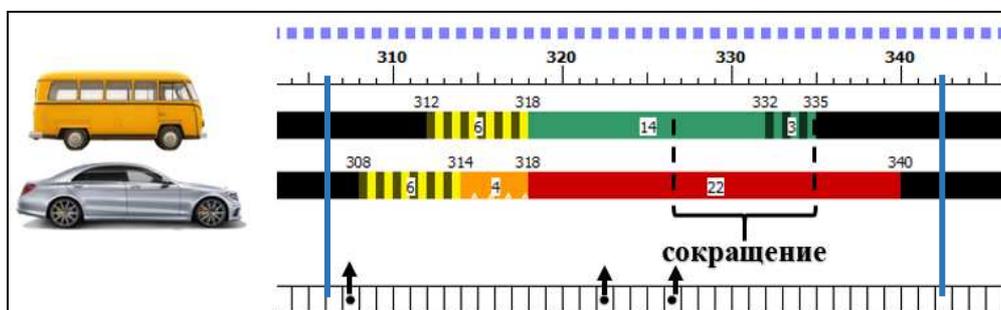


Рисунок 11. – Диаграмма светофорного регулирования при нескольких запросах на обслуживание

⁹ Логический датчик – абстрактный датчик, обрабатывающие данные с физического детектора.

Данный алгоритм, как и в первом случае, может быть принят на дорожных контроллерах типа «СИДК», которые поддерживают желтый мигающий сигнал в программах и обеспечивают организацию гибкого регулирования движения. Для этого достаточно выполнения тактов и переходов между ними в соответствии с рисунками 12 и 13.

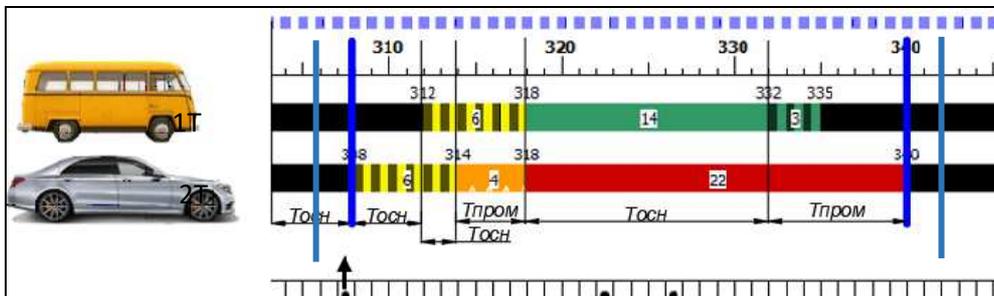


Рисунок 12. – Потактовое представление диаграммы светофорного регулирования на один цикл

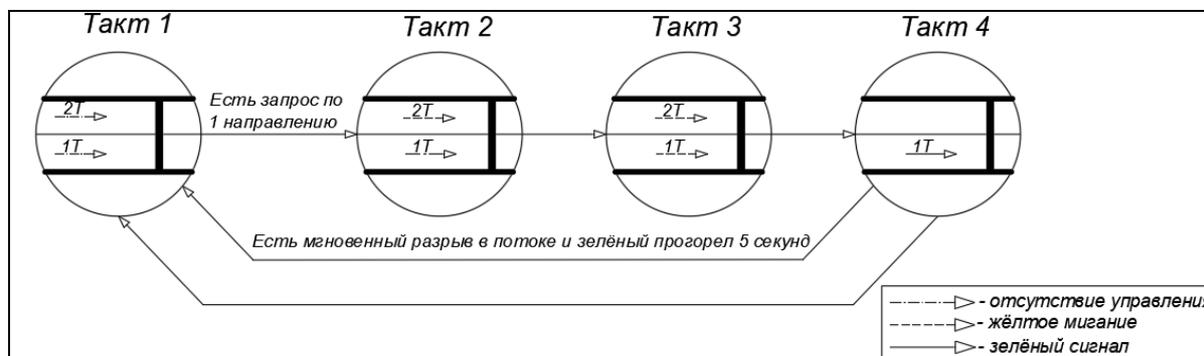


Рисунок 13. – Потактовое переключение

Разработана схема предлагаемого размещения светофоров и основных элементов дорожной инфраструктуры, которая отражает планируемую организацию движения на рассматриваемом участке (рисунок 14).

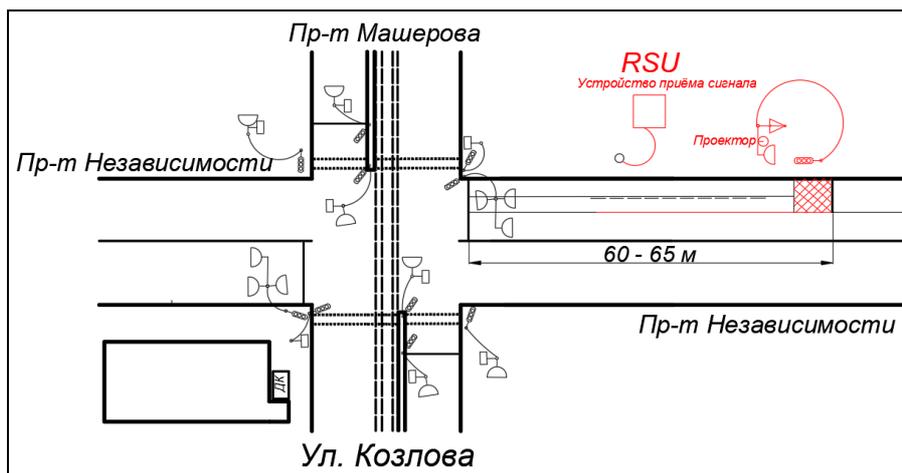


Рисунок 14. – Схема предполагаемого размещения светофоров и основных элементов дорожной инфраструктуры

Имеет смысл нанести стоп-линию за 60–65 м до перекрестка (по результатам замеров максимальной очереди). Справа, на тротуаре или газоне, согласно СТБ 1300, на расстоянии 10 м от стоп-линии устанавливается граненая светофорная опора. На этой опоре справа размещается светофор для выделенной полосы Т.8. Для второй полосы сверху на опоре устанавливается светофор Т.1. Вместе со светофором Т.1 монтируется экран с черным фоном и белой каймой, а под ним размещается знак 7.14, указывающий, что действие сигнала распространяется только на полосу, находящуюся под знаком.

Кроме того, на светофорной опоре устанавливается проектор, дублирующий сигналы обоих светофоров, чтобы водители других транспортных средств с большей вероятностью могли их заметить. Для светофора Т.8 используются маски в виде стрелки «Движение разрешено» и символа автобуса. Перед стоп-линией наносится разметка 1.37 и устанавливается экран со светоотражающей краской для проецирования сигналов с проектора (рисунок 15). Также в 20 м от самого перекрестка на опоре освещения будет установлен коммуникационный модуль TEDIX системы LTE-V2X для передачи запроса от водителя к дорожному контроллеру.



Рисунок 15. – Визуальное представление проектного решения на исследуемом объекте

Для организации передачи запроса от водителя маршрутного пассажирского транспортного средства к дорожному контроллеру наиболее перспективным представляется использование технологии LTE V2X.

LTE-V2X (Cellular Vehicle-to-Everything) – это современный стандарт связи, разработанный для обеспечения взаимодействия между транспортными средствами и дорожной инфраструктурой. LTE-V2X сочетает преимущества сотовых сетей (4G/5G) и прямых радиоканалов. Это позволяет достичь высокой надежности передачи данных и минимальной задержки, что особенно важно для задач управления уменьшения блокировок движения маршрутного пассажирского транспорта в условиях городской среды. Интеграция с мобильными сетями открывает возможности для масштабируемых решений, охватывающих протяженные маршруты и сложные транспортные узлы.

В качестве технической реализации технологии LTE-V2X можно использовать оборудование, в частности компании Fort Telesom, выпускаемое под брендом TEDIX.

Архитектура этой системы строится на следующих ключевых компонентах:

- бортовой модуль LTE-V2X (OBU – On Board Unit (TEDIX)) – устройство, устанавливаемое в салоне автобуса, служит связующим звеном между водителем и дорожной инфраструктурой. Оно оснащено цифровыми входами для подключения кнопки ручного управления. Также есть подключение к TEDIX-Connect – мобильное приложение на базе операционной системы Android для приема информации от придорожного коммуникационного модуля (рисунки 16 и 17);

- придорожный коммуникационный модуль (RSU – Road Site Unit (TEDIX)) – придорожный терминал, принимающий запросы от OBU и передающий их на светофорный контроллер, например, СИДК (рисунок 18);

- сервер управления ИТС – централизованная платформа, обрабатывающая данные со всех перекрестков и координирующая их работу для оптимизации движения на масштабах города. Однако стоит отметить, что технология обеспечивает прямую и надежную связь между маршрутным транспортным средством и дорожной инфраструктурой без необходимости постоянного подключения к центральному серверу.

Принцип работы системы следующий: водитель автобуса или троллейбуса, заметив затор на выделенной полосе, нажимает кнопку, запускающую передачу сообщения с параметрами автобуса на RSU (частотный диапазон 5,9 ГГц). Дорожный контроллер получает запрос от RSU, включает зеленый сигнал светофора для выделенной полосы и временно ограничивает движение транспортным средствам, движущимся по второй полосе, устраняя блокировку. Подтверждение о получении запроса от водителя отображается на интерфейсе OBU, информируя водителей.



Рисунок 16. – Бортовой модуль LTE-V2X (TEDIX)



Рисунок 17. – Мобильное приложение на базе операционной системы Android



Рисунок 18. – Придорожный коммуникационный модуль RSU

Представленные технические решения и алгоритмы направлены на повышение безопасности и оптимизацию движения маршрутного пассажирского транспорта за счет минимизации блокировок.

Для оценки результативности и эффективности разработанных алгоритмов использовался программный комплекс SUMO (Simulation of Urban MObility). Этот инструмент позволяет проводить моделирование и симуляцию городских транспортных потоков, что важно для анализа и оптимизации дорожного движения.

Далее была выполнена калибровка модели, основанная на реальных данных о движении потока транспортных средств. Калибровка включала настройку параметров модели для обеспечения максимального соответствия симуляции реальным условиям дорожного движения. SUMO по умолчанию использует Крауссову модель для симуляции движения транспортных средств. Для достижения реалистичного поведения автомобилей в симуляции параметры этой модели были изменены и адаптированы.

Процесс калибровки включал итеративные изменения параметров и последующее тестирование модели, чтобы достичь оптимального соответствия между симулированными и реальными данными. Для этого использовались данные о дорожном движении, собранные на исследуемом объекте, что позволило создать высокореалистичную модель дорожного потока.

После завершения калибровки и настройки параметров модели были проведены симуляции, которые включали два ключевых этапа: проведение имитационного эксперимента с существующими настройками светофорного объекта и эксперимента с предлагаемыми мерами уменьшения блокировок движения маршрутных транспортных средств.

Симуляции, по которым производилась оценка эффективности, моделировали 1,5 ч для каждого рассматриваемого варианта. Симуляции были проведены в 21 прогон.

В качестве показателя результативности использовались показатели общих задержек транспортных средств на исследуемом перекрестке, которые были рассчитаны с помощью SUMO. Система рассчитала задержки [3; 4] для всех транспортных средств: автобусов, транспортных средств, которые движутся в прямом направлении, и для правоповоротных транспортных средств.

Также было проведено тестирование гипотез для пересекающихся бокс-диаграмм задержек, которое показало, что при предлагаемых вариантах 1 и 2 задержки легковых автомобилей статистически не отличаются от исходного варианта, в то время как для маршрутных пассажирских транспортных средств варианты 1 и 2 статистически значимо отличны от исходных.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Общие задержки транспортных средств (за 1,5 ч)

Общие задержки, авт*ч	Существующие	Предлагаемые Вариант-1	Предлагаемые Вариант-2
Автобусы	0,63	0,47	0,49
Прямодвижущиеся ТС	26,79	25,69	25,42
Правоповоротные ТС	12,99	11,75	11,8

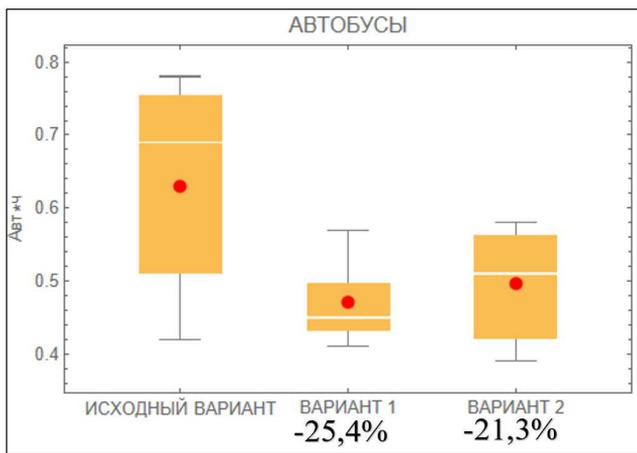


Рисунок 19. – Сравнительная бокс-диаграмма общих задержек автобусов

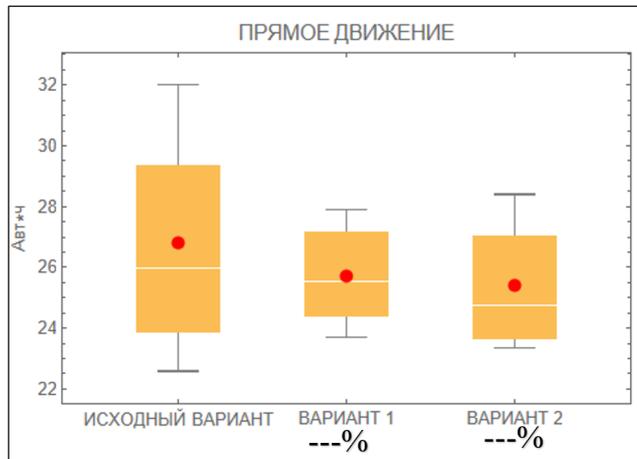


Рисунок 20. – Сравнительная бокс-диаграмма общих задержек транспортных средств, движущихся в прямом направлении

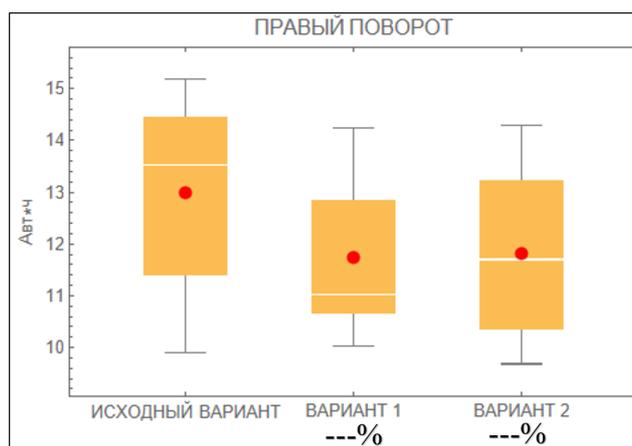


Рисунок 21. – Сравнительная бокс-диаграмма общих задержек транспортных средств, движущихся направо

Сравнительные бокс-диаграммы задержек ТС при различных вариантах – см. рисунки 19–21.

На основании приведенных данных анализа бокс-диаграмм можно сделать вывод, что введение первого варианта проектного решения является достаточно результативным, и что его использование приведет к снижению задержек для маршрутных транспортных средств на 25,4%. Введение второго варианта проектного решения даст возможность снизить задержки для маршрутных транспортных средств на 21,3%. Для прямодвижущихся и правоповоротных транспортных средств ситуация не изменилась.

Результаты расчета годовых потерь от задержек представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Годовые потери от задержек транспортных средств

Потери от общих задержек, у.е./год	Существующие	Предлагаемые Вариант-1	Предлагаемые Вариант-2
Автобусы	81 497	60 799	63 386
Прямодвижущиеся ТС	247 540	237 376	234 881
Правоповоротные ТС	120 028	108 570	109 032

Таким образом, проектное решение, при капитальных вложениях 4641 у.е.: потери от задержек транспортных средств снижаются на 20 698 у.е./год; срок окупаемости капиталовложений – 80 дн.; годового экономического эффект составит 19 167 у.е./год; при этом на 1 у.е. капитальных вложений потери от задержек сокращаются на 4,46 у.е./год.

Заключение. Разработаны и внедрены подходы к гибкому управлению светофорами на базе интеллектуальных транспортных систем для обеспечения уменьшения блокировок движения маршрутных транспортных средств другими транспортными средствами. Апробация выполнена на перекрестке проспекта Независимости – проспекта Машерова – улицы Козлова. Данный перекресток является одним из наиболее загруженных транспортных узлов городской транспортной сети г. Минска, где часто маршрутные пассажирские транспортные средства блокируются правоповоротными транспортными средствами, которые, в свою очередь, блокируются из-за пешеходов, переходящих проезжую часть, особенно в часы пик.

Разработаны: алгоритм управления, предполагающий активацию диаграммы светофорного регулирования, где неиспользуемое время не сокращается (Вариант-1), и алгоритм управления, предполагающий активацию диаграммы светофорного регулирования на один цикл, где неиспользуемое время сокращается до минимума в случае отсутствия дополнительных маршрутных транспортных средств (Вариант-2).

Оценка показателей эффективности была произведена с помощью имитационного моделирования в SUMO. Получены следующие показатели эффективности: общие часовые задержки для маршрутных транспортных средств при введении первого варианта проектного решения сократились на 25,4%, а введение второго варианта проектного решения способствовало снижению задержек на 21,3%; потери от задержек маршрутных пассажирских транспортных средств уменьшились на 20 698 у.е./год; срок окупаемости капиталовложений – 80 дн.; годового экономического эффект составит 19 167 у.е./год; при этом на 1 у.е. капитальных вложений потери от задержек сокращаются на 4,46 у.е./год.

ЛИТЕРАТУРА

- Капский Д.В., Семченков С.С., Ларин О.Н. Повышение эффективности применения информации при организации перевозок пассажиров в городах // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 4. – С. 323–330. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-323-330

2. Кузнецов А.В., Кузнецова Е.В. Пути повышения эксплуатационной скорости наземного городского пассажирского транспорта общего пользования // Наука и техника. – 2015. – № 2. – С. 130–134.
3. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
4. Кот Е.Н., Капский Д.В., Коржова А.В. Технические средства организации дорожного движения: практикум: учеб. пособие. – Минск: БНТУ, 2016. – 239 с.

REFERENCES

1. Kapskii, D.V., Semchenkov, S.S. & Larin, O.N. (2022). Povyshenie effektivnosti primeneniya informatsii pri organizatsii perevozok passazhirov v gorodakh [Improving the Efficiency of Information Application in the Organization of Passenger Transportation in Cities]. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, 21(4), 323–330. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-4-323-330 (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Kuznetsov, A.V. & Kuznetsova, E.V. (2015). Puti povysheniya ekspluatatsionnoi skorosti nazemnogo gorodskogo passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya. *Nauka i tekhnika [Science & Technique]*, (2), 130–134. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Vrubel', Yu.A., Kapskii, D.V. & Kot, E.N. (2006). *Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
4. Kot, E.N., Kapskii, D.V. & Korzhova, A.V. (2016). *Tekhnicheskie sredstva organizatsii dorozhnogo dvizheniya: praktikum: ucheb. posobie*. Minsk: BNTU. (In Russ.).

Поступила 22.06.2025

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF FLEXIBLE CONTROL ALGORITHMS
TO IMPROVE THE QUALITY OF TRAFFIC OF ROUTE PASSENGER VEHICLES
AT CONTROLLED INTERSECTIONS**

LIU YUWEI, D. SARAZHINSKY

(Belarusian National Technical University, Minsk)

D. KAPSKI

(Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk;

Belarusian National Technical University, Minsk;

Academy of Public Administration under the President of the Republic of Belarus, Minsk)

The article analyzes existing methods and technologies aimed at reducing blockages of route passenger passenger vehicles at controlled intersections. Options based on intelligent transport systems, flexible traffic control algorithms and modern means of traffic light control have been developed to reduce blockages of route passenger vehicles. The effectiveness of the proposed solutions and their efficiency have been assessed using simulation micro-modeling.

Keywords: *route passenger passenger vehicles, controlled intersection, flexible control, algorithms, control.*

УДК 656.13

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-53-59

РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДУБЛИРУЕМОСТИ МАРШРУТОВ И РАЗРАБОТКА НАПРАВЛЕНИЙ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ ГОРОДСКОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА РЕГУЛЯРНОГО СООБЩЕНИЯ

канд. техн. наук, доц. С.А. АЗЕМША
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)

В современных условиях функционирования пассажирских перевозчиков особенно актуальной становится задача оптимизации маршрутных сетей. Одной из наиболее распространенных проблем, снижающих эффективность их работы, является дублируемость маршрутов. В связи с этим возникает необходимость в разработке и применении научно обоснованных методов оценки и оптимизации маршрутных сетей, направленных на снижение дублируемости маршрутов и повышение эффективности использования пассажирских транспортных средств.

В рамках данной публикации рассматривается проблема дублированности маршрутов городского пассажирского транспорта регулярного сообщения г. Бреста. Для решения такой проблемы разработаны показатели оценки дублируемости, методика их расчета; определены значения для условий г. Бреста; приведены различные направления оптимизации работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения г. Бреста.

Ключевые слова: городской пассажирский транспорт, маршрут, оптимизация маршрутных сетей, дублированность маршрутов.

Введение. Проблеме дублируемости маршрутов (ДМ) городского пассажирского транспорта регулярного сообщения (ГПТРС) в научной литературе уделено немало внимания. Проведенный обзор такой литературы позволил сформировать следующие выводы:

1. ДМ имеет как положительные, так и отрицательные аспекты [1–4]. К положительным следует отнести:

- возможность выполнения передвижения без пересадки;
- альтернативные варианты поездки для пассажиров.

К отрицательным:

- высокую конкуренцию перевозчиков за пассажиров, особенно в межпиковое время, что является причиной нарушений правил дорожного движения водителем, создания конфликтных ситуаций, возникновения дорожно-транспортных происшествий;
- существенное усложнение работы пассажирских транспортных средств (ПТС) большой вместимости в связи с дроблением пассажиропотока между дублирующими маршрутами;
- применение автобусов малого и в редких случаях среднего класса на дублирующих маршрутах, что требует их большего количества для обеспечения провозной способности, а значит, и большего количества водителей, топлива и смазочных материалов, что ведет к увеличению стоимости функционирования ГПТРС;
- увеличение общего расхода топлива на всех дублирующих маршрутах, что закономерно будет способствовать росту количества загрязняющих веществ, выбрасываемых ПТС в атмосферу;
- большую сумму субсидий на покрытие межтарифной разницы при наличии маршрутов с регулируемым тарифом;
- низкую частоту движения ПТС на отдельных маршрутах;
- большую загруженность остановочных пунктов (ОП) и, как следствие, образование заторов и вероятность дорожно-транспортных происшествий;
- снижение скорости доставки пассажиров;
- снижение наполняемости, а значит, снижение окупаемости работы ГПТРС.

Утверждается, что положительные аспекты проявляются при допустимой дублируемости. Избыточная же дублируемость является источником описанных выше проблем.

Основная часть. Для оценки избыточности (допустимости) ДМ авторы предлагают ряд критериев [5; 6; 1; 3; 4; 7–11]. Избыточным дублированием предложено считать:

- по критерию, учитывающему протяженность одинаковых участков маршрутов: 60–95% [5], более 75% [6; 4; 8], более 70% [1; 3; 11; 9];
- по критерию, описанному в [7], – более 80% совпадения маршрутов признаются избыточным дублированием;
- по критерию, описанному в [10], – более 50% совпадения маршрутов признаются избыточным дублированием.

Для маршрутов с допустимым дублированием авторы предлагают синхронизацию расписания движения [6; 4; 7]. Для маршрутов с избыточным дублированием рекомендуется:

1) исключение маршрутов, обслуживаемых частными перевозчиками автобусами малой вместимости; обеспечение приоритета маршрутам, обслуживаемым троллейбусами с автономным ходом [12; 13]; закрытие автобусных и сохранение троллейбусных маршрутов при наличии 100% ДМ таких видов ГПТРС [9; 14; 15];

2) исключение дублирующих маршрутов [5; 3; 4; 7] по одному из следующих вариантов [4; 7] (рисунок 1):

а) оба маршрута проходят по одной и той же траектории и один маршрут длиннее второго – рекомендуется исключить менее протяженный маршрут;

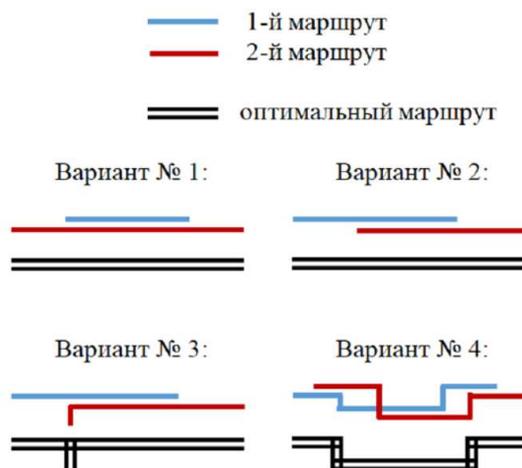


Рисунок 1. – Варианты ДМ ГПТРС [7]

б) требуется наличие двух маршрутов, пересекающихся по одной траектории, проходящей в центральной или срединной части города с совпадением на отдельных участках. В этом случае целесообразно удлинить любой из маршрутов таким образом, чтобы он включал в себя траекторию обоих маршрутов, т.е. вместо двух маршрутов создается один более длинный;

в) предполагается наличие пары маршрутов, в котором один может частично отклоняться в сторону от другого, при этом отклоняющийся маршрут, как правило, имеет несколько ОП в стороне от основных улиц и заканчивается конечным ОП. В этом случае целесообразно использовать новую схему движения маршрута, включающую оба маршрута с отклонением от основной траектории движения на несколько ОП и последующим возвратом;

г) предполагается наличие совпадающих по траектории движения маршрутов, однако отклоняющихся на одном–двух участках, расположенных на параллельных улицах на удалении до 500 м друг от друга. В этом случае целесообразно выбрать маршрут, проходящий между конечными точками обоих маршрутов по улицам более высокого уровня или включающий большее количества точек тяготения;

3) создание системы магистральных и подвозящих маршрутов [1; 3; 16; 13] (рисунок 2);

4) объединение маршрутов с перераспределением ПТС на наиболее востребованный [3].

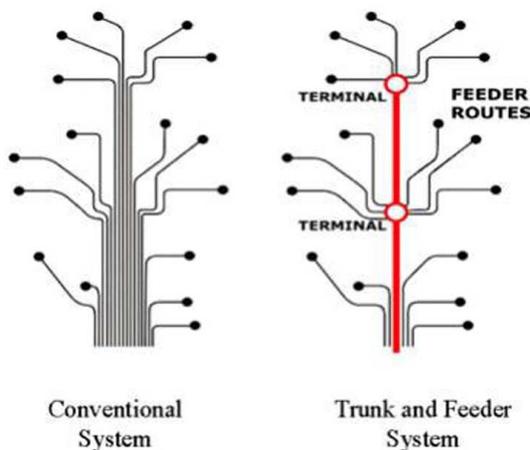


Рисунок 2. – Схемы организации движения ГПТРС [1]

Анализ литературы по ДМ ГПТРС послужил основой для разработки методики расчета показателей таковой дублируемости для г. Бреста и ее последующего применения в сложившихся условиях рассматриваемого населенного пункта. Для оценки ДМ использовались следующие локальные показатели:

- 1) коэффициент совпадения длины маршрутов [1; 3–6; 8; 9; 11]:

$$K2_{x,y} = \frac{\sum L_{оп_{x,y}}}{\sum L_{п_x}}, \quad (1)$$

где $\sum L_{оп_{x,y}}$ – суммарная длина перегонов, которые есть как на маршруте x , так и на маршруте y , км;
 $\sum L_{п_x}$ – суммарная длина перегонов на маршруте x , км.

Данный коэффициент показывает, насколько маршрут y дублирует маршрут x по длине. Чем ближе значение этого коэффициента к 1, тем больше такое дублирование, а чем ближе к 0 – тем меньше. Принято, что при значении $K2_{x,y} > 0,7$ дублирование маршрутом y маршрута x будет считаться избыточным;

- 2) коэффициент совпадения остановочных пунктов (ОП) маршрутов [7]:

$$K3_{x,y} = \frac{Кооп_{x,y}}{Коп_x}, \quad (2)$$

где $Кооп_{x,y}$ – количество ОП с одинаковым названием, которые есть как на маршруте x , так и на маршруте y , ед.;
 $Коп_x$ – общее количество ОП на маршруте x , ед.

Данный коэффициент показывает, насколько маршрут y дублирует маршрут x по количеству ОП с одинаковым названием. Чем ближе значение этого коэффициента к 1, тем больше такое дублирование, а чем ближе к 0 – тем меньше. Принято, что при значении $K3_{x,y} > 0,7$ дублирование маршрутом y маршрута x будет считаться избыточным;

- 3) коэффициент совпадения межстаночных связей маршрутов [10]:

$$K4_{x,y} = \frac{Комс_{x,y}}{Кмс_x}, \quad (3)$$

где $Комс_{x,y}$ – количество одинаковых межстаночных связей, которые есть как на маршруте x , так и на маршруте y , ед;

$Кмс_x$ – количество межстаночных связей на маршруте x , ед.

Данный коэффициент показывает, насколько маршрут y дублирует маршрут x по количеству межстаночных связей. Чем ближе значение этого коэффициента к 1, тем больше такое дублирование, а чем ближе к 0 – тем меньше. Принято, что при значении $K4_{x,y} > 0,5$ дублирование маршрутом y маршрута x будет считаться избыточным.

Описанные выше локальные показатели оценки ДМ ГПТРС позволяют оценивать дублируемость с точки зрения какого-то одного параметра (общих перегонов, одинаковых ОП и т.д.) и могут быть использованы для оценки дублируемости пары маршрутов.

Для одновременного учета нескольких локальных показателей ДМ ГПТРС предлагаются следующие интегральные показатели оценки такой дублируемости:

- 1) совокупный рейтинг дублируемости пары маршрутов:

$$RS_{x,y} = R2_{x,y} + R3_{x,y} + R4_{x,y}, \quad (4)$$

где $R2_{x,y}$ – рейтинг дублируемости маршрутом y маршрута x по коэффициенту $K2$;

$R3_{x,y}$ – рейтинг дублируемости маршрутом y маршрута x по коэффициенту $K3$;

$R4_{x,y}$ – рейтинг дублируемости маршрутом y маршрута x по коэффициенту $K4$.

В свою очередь:

$$R2_{x,y} = \frac{K2_{x,y}}{\max(K2)}, \quad (5)$$

$$R3_{x,y} = \frac{K3_{x,y}}{\max(K3)}, \quad (6)$$

$$R4_{x,y} = \frac{K4_{x,y}}{\max(K4)}, \quad (7)$$

где $\max(K2), \max(K3), \max(K4)$ – максимальное значение, соответственно, коэффициента $K2, K3, K4$.

Совокупный рейтинг дублируемости пары маршрутов позволит группировать (ранжировать) пары маршрутов по степени их дублируемости с одновременным учетом трех коэффициентов дублируемости. Чем выше значение $RS_{x,y}$, тем больше маршрут y дублирует маршрут x ;

2) рейтинг вклада маршрута в дублируемость:

$$R_x = RO_x + RR_x + RV_x, \quad (8)$$

где RO_x – относительный рейтинг вклада маршрута x в дублируемость;

RR_x – относительный рейтинг маршрута x по количеству выполняемых на нем оборотных рейсов;

RV_x – относительный рейтинг маршрута x по средней вместимости работающих на нем ПТС.

В свою очередь относительный рейтинг вклада маршрута x в дублируемость:

$$RO_x = \frac{RS_x}{\max(RS)}, \quad (9)$$

где RS_x – сумма всех совокупных рейтингов дублируемости пары маршрутов для маршрута x , для которых маршрут x имеет избыточную дублируемость хотя бы по одному коэффициенту дублируемости;

$\max(RS)$ – маршрут с максимальным значением RS_x .

Сумма всех совокупных рейтингов дублируемости пары маршрутов для маршрута x , для которых маршрут x имеет избыточную дублируемость хотя бы по одному коэффициенту дублируемости:

$$RS_x = \sum RS_{x,y} + \sum RS_{y,x}. \quad (10)$$

Относительный рейтинг маршрута x по количеству выполняемых на нем оборотных рейсов:

$$RR_x = 1 - \left(\frac{Op_x}{\max(Op)} \right), \quad (11)$$

где Op_x – количество оборотных приведенных рейсов, выполняемых на маршруте x ;

$\max(Op)$ – маршрут с максимальным значением количества оборотных приведенных рейсов.

Количество оборотных приведенных рейсов, выполняемых на маршруте x :

$$Op_x = \frac{247 \cdot Op_x + 118 \cdot Ov_x}{247 + 118}, \quad (12)$$

где Op_x – количество оборотных рейсов, выполняемых на маршруте x в рабочий день (представляется заказчиком данной НИР);

Ov_x – количество оборотных рейсов, выполняемых на маршруте x в выходной день (представляется заказчиком данной НИР);

118 – количество выходных дней в году;

247 – количество рабочих дней в году.

Относительный рейтинг маршрута x по средней вместимости работающих на нем ПТС:

$$RV_x = 1 - \left(\frac{V_x}{\max(V)} \right), \quad (13)$$

где V_x – средняя вместимость маршрутных транспортных средств, работающих на маршруте x (предоставляется заказчиком данной НИР);

$\max(V)$ – маршрут с максимальным значением вместимости работающих на нем ПТС.

Рейтинг вклада маршрута в дублируемость (выражение (8)) позволит ранжировать каждый отдельный маршрут по его вкладу в суммарную дублируемость для всей маршрутной сети за счет учета всех значений совокупного рейтинга дублируемости данного маршрута (выражение (4)), а также востребованности данного маршрута, выраженной количеством выполняемых на нем рейсов (выражение (11)) и средней вместимостью работающих на ПТС (выражение (13)). Чем выше значение R_x , тем больше вклад маршрута x в дублируемость маршрутной сети.

Описанные выше локальные и интегральные показатели ДМ ГПТРС были рассчитаны для маршрутной сети г. Бреста, представленной 95 маршрутами. Всего были рассчитаны значения:

- показателей (1)–(4) для 4230 пар маршрутов;
- показателя (8) для 95 маршрутов.

Было установлено, что наблюдается избыточная ДМ:

- по показателю $K_{2,x,y}$ – для 47 пар маршрутов;
- $K_{3,x,y}$ – для 104 пар маршрутов;
- $K_{4,x,y}$ – для 79 пар маршрутов.

С учетом этого были рассчитаны интегральные показатели ДМ:

- $RS_{x,y}$ – для 110 пар маршрутов;
- R_x – для 71 маршрута.

На основании анализа полученных значений локальных и интегральных критериев оценки ДМ ГПТРС разработан ряд направлений оптимизации работы ГПТРС г. Бреста:

1. Поэтапное исключение маршрутов с наибольшим значением совокупного рейтинга дублируемости пар маршрутов ($RS_{x,y}$) – позволяет обосновать целесообразность закрытия маршрута с целью ликвидации маршрута из пары маршрутов с наибольшей дублируемостью.

2. Поэтапное исключение маршрутов с наибольшим значением рейтинга вклада маршрута в дублируемость (R_x) – позволяет обосновывать целесообразность закрытия маршрута с учетом его дублируемости с другими маршрутами.

3. Первостепенное развитие троллейбусного ГПТРС – позволяет снижать вредное воздействие ГПТРС на экологическую обстановку, использовать энергию, полученную Белорусской АЭС.

4. Первостепенное развитие экспрессных ГПТРС частной формы собственности – позволяет снизить затраты бюджета на функционирование ГПТРС за счет передачи обслуживания пассажиров на экспрессные маршруты с возможной корректировкой (в сторону уменьшения) стоимости проезда.

5. Первостепенное развитие автобусного и троллейбусного ГПТРС государственной формы собственности – позволяет передать пассажиропоток с ГПТРС экспрессного сообщения на автобусный и троллейбусный виды ГПТРС, что повысит их наполняемость и, следовательно, окупаемость работы.

6. Создание системы магистральных и подвозных маршрутов (см. Рисунок 2) – позволит повысить окупаемость работы ГПТРС за счет повышения эффективности использования их пробега и вместимости.

Заключение. Таким образом, в данной публикации для разработки направлений оптимизации работы ГПТРС предложен ряд локальных и, разработанных автором данной статьи интегральных показателей оценки ДМ ГПТРС. На основании расчета их значений предложен ряд направлений оптимизации работы ГПТРС г. Бреста.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трощенко К.А., Карпушенко К.Р., Войтенков С.С. Дублирование маршрутов городского пассажирского транспорта: преимущества и недостатки // Образование. Транспорт. Инновации. Строительство: сб. материалов V Нац. науч.-практ. конф. / Омск (28–29 апр. 2022 г.) – Омск: Сиб. гос. автомобил.-дорож. ун-т (СибАДИ), 2022. – С. 236–240.
2. Выгузова А.О. Проблема дублирования маршрутов пассажирским транспортом в городе Иркутске и предложение по ее решению // Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения: сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. / Пенза (05 авг. 2017 г.) – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. – Ч. 2. – С. 53–55.
3. Фаттахова А.Ф. Оценка дублирования регулярных маршрутов пассажирского транспорта города Оренбурга // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф. / Оренбург (20–22 нояб. 2019 г.). – Оренбург: Оренбург. гос. ун-т, 2019. – С. 649–654.
4. Сиваков В.В., Тихомиров П.В., Камынин В.В. Исследование маршрутной совмещенности пассажирской сети города Брянска // Мир транспорта и технологических машин. – 2021. – № 3(74). – С. 43–49. DOI: 10.33979/2073-7432-2021-74-3-43-49
5. Енин Д.В. Подходы к определению уровня дублирования маршрутов регулярных перевозок // Мир транспорта. – 2021. – Т. 19, № 1(92). – С. 210–228. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-1-210-228
6. Сиваков В.В., Камынин В.В., Тихомиров П.В. Совершенствование транспортного обслуживания в городе Брянске // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20, № 4(101). – С. 105–110. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-4-9
7. Касаткина Е.В., Вавилова Д.Д. Анализ данных системы городского общественного транспорта для решения проблемы дублируемости маршрутов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2022. – № 1. – С. 66–78. DOI: 10.17308/sait.2022.1/9202
8. Подшивалова К.С., Назаров В.А. Анализ работы системы общественного транспорта г. Пензы // Образование и наука в современном мире. Инновации. – 2021. – № 5(36). – С. 121–129.
9. Мелашенко О.И. Некоторые результаты внедрения новой схемы маршрутов общественного транспорта в г. Волгограде // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф. / Волгоград (23–25 мая 2018 г.). – Волгоград: Волгоград. гос. техн. ун-т, 2018. – С. 211–215.
10. Таубкин Г.В. Межмаршрутное дублирование: количественные методы анализа = Route redundancy: quantitative methods of analysis // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния = Social and economic problems of city transport systems and their influence areas' development and functioning: материалы XXIII Междунар. (XXVI Екатеринбургской, I Минской) науч.-практ. конф. / Минск (16–17 июня 2017 г.). – Минск: БНТУ, 2017. – С. 260–267.

11. Митюгин В.А., Пышный В.А. Анализ основных параметров функционирования систем муниципального пассажирского транспорта общего пользования на примере города Тулы // 60-я Науч.-практ. конф. проф.-препод. состава ТулГУ с всерос. участием: сб. докладов / Тула (05–09 февр. 2024 г.). – Тула: Тул. гос. ун-т, 2024. – С. 162–170.
12. Сиваков В.В., Боровая К.С., Дракунов И.И. Перспективы развития автопарка общественного транспорта в г. Брянске // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2022. – № 4. – С. 44–50. DOI: 10.15593/24111678/2022.04.05
13. Грищук Д.В. Оценка эффективности системы автобусного транспорта Казани // Молодеж. вестн. ИрГТУ. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 82–87.
14. Федорченко А.Г., Гвоздь А.А. Проблемы и пути решения дублирования автобусных маршрутов г. Горловка // Научно-технические аспекты развития автотранспортного комплекса 2018: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. / Горловка (24 мая 2018 г.). – Горловка: Донец. нац. техн. ун-т, 2018. – С. 270–272.
15. Якимов М.Р. Этапы формирования эффективной маршрутной системы городского пассажирского транспорта общего пользования города Дзержинска // Бюллетень транспортной информации. – 2020. – № 5(299). – С. 11–15.
16. Трощенко К.А., Войтенков С.С. Повышение качества транспортного обслуживания за счет устранения неэффективного дублирования маршрутов // Техника и технологии наземного транспорта: сб. тр. аспирантов (с междунар. участием) / под науч. ред. Е.Е. Витвицкого. – Омск: Сиб. гос. автомобил.-дорож. ун-т (СибАДИ), 2022. – С. 55–63.

REFERENCES

1. Troshchenko, K.A., Karpushchenko, K.R. & Voitenkov, S.S. (2022). Dublirovaniye marshrutov gorodskogo passazhirskogo transporta: preimu-shchestva i nedostatki. *Obrazovanie. Transport. Innovatsii. Stroitel'stvo: Sbornik materialov V Natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Omsk, 28–29 apr. 2022 g.* (236–240). Omsk: Sibirskii gosudarstvennyi avtomobil'no-dorozhnyi universitet (SibADI). (In Russ.).
2. Vyuzova, A.O. (2017). Problema dublirovaniya marshrutov passazhirskim transportom v gorode Irkutske i predlozhenie po ee reshe-niyu. *Nauka i innovatsii v XXI veke: aktual'nye voprosy, otkrytiya i dostizheniya: sbornik statei V Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii: v 2 ch., Penza, 05 avgusta 2017 g., Chast' 2* (53–55). Penza: Nauka i Prosveshchenie (IP Gulyaev G.Yu.). (In Russ.).
3. Fattakhova, A.F. (2019). Otsenka dublirovaniya regul'yarnykh marshrutov passazhirskogo transporta goroda Orenburga. *Progressivnye tekhnologii v transportnykh sistemakh: Sbornik materialov XIV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Orenburg, 20–22 noyab. 2019 g.* (649–654). Orenburg: Orenburgskii gosudarstvennyi universitet. (In Russ.).
4. Sivakov, V.V., Tikhomirov, P.V. & Kamynin, V.V. (2021). Issledovaniye marshrutnoi sovmeshchennosti passazhirskoi seti goroda Bryanska [Study of the Route Alignment of the Passenger Network in the Bryansk Town]. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin [World of transport and technological machines]*, 3(74), 43–49. DOI: 10.33979/2073-7432-2021-74-3-43-49 (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Enin D.V. (2021). Podkhody k opredeleniyu urovnya dublirovaniya marshrutov regul'yarnykh perezozok [Approaches to Determining the Regular Transit Route Duplication Level]. *Mir transporta [World of Transport and Transportation]*, 19-1(92), 210–228. DOI: 10.30932/1992-3252-2021-19-1-210-228 (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Sivakov, V.V., Kamynin, V.V. & Tikhomirov, P.V. (2022). Sovershenstvovaniye transportnogo obsluzhivaniya v gorode Bryanske [Improving Transport Services in Bryansk]. *Mir transporta [World of Transport and Transportation]*, 20-4(101), 105–110. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-4-9 (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Kasatkina, E.V. & Vavilova, D.D. (2022). Analiz dannykh sistemy gorodskogo obshchestvennogo transporta dlya resheniya problemy dublirovaniya marshrutov [Data Analysis of Public Urban Transport System to Solve the Problem of Route Duplication]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii [Proceedings of VSU, Series: Systems Analysis and Information Technologies]*, (1), 66–78. DOI 10.17308/sait.2022.1/9202 (In Russ., abstr. in Engl.).
8. Podshivalova, K.S. & Nazarov, V.A. (2021). Analiz raboty sistemy obshchestvennogo transporta g. Penzy [Analysis of Public Transport System Operation in Penza]. *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Innovatsii*, 5(36), 121–129. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Melashchenko, O.I. (2018). Nekotorye rezul'taty vnedreniya novoi skhemy marshrutov obshchestvennogo transporta v g. Volgograde. *Molodezh' i nauchno-tekhnicheskii progress v dorozhnoi otrasli yuga Rossii: materialy XII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii, Volgograd, 23–25 maya 2018 g.* (211–215). Volgograd: Volgogradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. (In Russ.).
10. Taubkin, G.V. (2017). Mezhdublirovaniye: kolichestvennye metody analiza [Route redundancy: quantitative methods of analysis]. *Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya [Social and economic problems of city transport systems and their influence areas' development and functioning: materialy XXIII Mezhdunarodnoi (XXVI Ekaterinburgskoi, I Minskoi) nauchno-prakticheskoi konferentsii, Minsk, 16–17 iyunya 2017 g.* (260–267). Minsk: BNTU. (In Russ.).
11. Mityugin, V.A. & Pyshnyi, V.A. (2024). Analiz osnovnykh parametrov funktsionirovaniya sistem munitsipal'nogo passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya na primere goroda Tuly. *60-ya Nauchno-prakticheskaya konferentsiya prof.-prepod. sostava TulGU s vseros. uchastiem: sb. dokl., Tul'a, 05–09 fevr. 2024 g.* (162–170). Tula: Tul'skii gosudarstvennyi universitet. (In Russ.).
12. Sivakov, V.V., Borovaya, K.S. & Drakunov, I.I. (2022). Perspektivy razvitiya avtoparka obshchestvennogo transporta v g. Bryanske [Prospects for the Development of the Fleet of Public Transport in the City of Bryansk]. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya [Transport. Transport Facilities. Ecology]*, (4), 44–50. DOI: 10.15593/24111678/2022.04.05 (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Grishchuk, D.V. (2019). Otsenka effektivnosti sistemy avtobusnogo transporta Kazani. *Molodezhnyi vestnik IrGTU*, 9(2), 82–87. (In Russ.).

14. Fedorchenko, A.G. & Gvozd', A.A. (2018). Problemy i puti resheniya dublirovaniya avtobusnykh marshrutov g. Gorlovka. *Nauchno-tekhnicheskie aspekty razvitiya avtotransportnogo kompleksa 2018: materialy IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Gorlovka, 24 maya 2018 g.* (270–272). Gorlovka: Donets. nats. tekhn. un-t. (In Russ.).
15. Yakimov, M.R. (2020). Etapy formirovaniya effektivnoi marshrutnoi sistemy gorodskogo passazhirskogo transporta obshchego pol'zovaniya goroda Dzerzhinska. *Byulleten' transportnoi informatsii*, 5(299), 11–15. (In Russ.).
16. Troshchenko, K.A. & Voitenkov, S.S. (2022). Povyshenie kachestva transportnogo obsluzhivaniya za schet ustraneniya neeffektivnogo dublirovaniya marshrutov. In E.E. Vitvitskogo (Ed.). *Tekhnika i tekhnologii nazemnogo transporta: sb. tr. aspirantov (s mezhdunar. uchastiem)* (55–65). Omsk: Sibirskii gosudarstvennyi avtomobil'no-dorozhnyi universitet (SibADI). (In Russ.).

Поступила 02.07.2025

**CALCULATION OF ROUTE DUPLICATION INDICATOR
AND DEVELOPMENT OF OPTIMIZATION DIRECTIONS OF WORK
CITY PASSENGER TRANSPORT REGULAR SERVICE**

S. AZEMSHA

(Belarusian State University of Transport, Gomel)

In the current conditions of passenger carriers' operation, the task of optimising route networks becomes particularly relevant. One of the most widespread problems reducing the efficiency of their work is route duplication. In this regard, there is a need to develop and apply scientifically based methods of evaluation and optimisation of route networks aimed at reducing route duplication and increasing the efficiency of passenger transport vehicles.

This publication considers the problem of duplication of regular urban passenger transport routes in Brest. In order to solve this problem, the indicators of duplicability assessment, the methodology of calculation of such indicators, their values for the conditions of Brest are developed, and various directions of optimisation of urban regular passenger transport of Brest are given.

Keywords: urban passenger transport, route, optimization of route networks, duplication of routes.

УДК 621.892

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-60-65

ПОВЫШЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЛАСТИЧНОЙ СМАЗКИ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ МИКРОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. А.В. ДУДАН,
канд. техн. наук, доц. Т.В. ВИГЕРИНА, канд. техн. наук, доц. С.В. ПИЛИПЕНКО,
И.И. ПИЛИПЁНОК*

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Приведены исследования износостойкости пары трения скольжения, эксплуатируемой с использованием комплексной литиевой смазки общего назначения с добавлением микроразмерных компонентов в виде нитрида бора (ИТМОЛ-150Н+3% BN). Вычислены коэффициенты полинома четвертой степени, позволяющие рассчитать величину массового износа и коэффициент трения на любом участке трения. Установлено, что интенсивность изнашивания пары трения скольжения снижается при модифицировании пластичной комплексной литиевой смазки ИТМОЛ-150Н частицами нитрида бора и ниже традиционно используемой смазки Литол-24 в 4–5 раз.

Ключевые слова: *пластичные смазочные материалы, модифицирующие добавки, массовый износ, транспортные средства.*

Введение. Эксплуатация транспортных и технологических средств в разнообразных условиях использования, таких как повышенная температура, запыленность, агрессивные химические среды и высокая влажность, неизбежно инициирует интенсивное изнашивание узлов и агрегатов машин. Этот процесс не только сокращает их срок службы, но и влечет за собой значительное увеличение расхода топлива и других эксплуатационных материалов, а также рост числа отказов. Последствия износа проявляются в снижении общей эффективности и безопасности работы техники, что приводит к большим экономическим потерям в масштабах промышленности. Износостойкость трибосопряжений – ключевой фактор надежности машин – критически зависит от физико-механических и химических свойств материалов трущихся поверхностей, которые формируются в процессе их взаимодействия. В этом сложном взаимодействии важнейшую роль в формировании оптимальных свойств и обеспечении долговечности узлов трения играет правильно подобранный и высокоэффективный смазочный материал.

Пластичные смазочные материалы (ПСМ) представляют собой особую категорию смазочных материалов, отличающихся от жидких масел наличием загустителя, иногда наполнителя и стабилизатора. Эта особенность позволяет им эффективно обеспечивать работоспособность подвижных соединений машин и оборудования общего назначения, а также значительно повышать их долговечность в сложных и экстремальных условиях эксплуатации, где жидкие смазки могут быть неэффективны или неприменимы. К таким условиям относятся, например, узлы, работающие с низкими скоростями, высокими нагрузками, при наличии вибраций, а также в условиях, требующих длительного сохранения смазочного слоя или герметизации узла [1–3]. Наряду с расширением области использования пластичных смазочных материалов повышаются запросы, определяемые ростом температуры, нагрузок, скоростью взаимного перемещения деталей и ужесточением других условий их применения. Это связано с тенденциями развития техники, что требует разработки новых смазочных материалов, обладающих повышенной нагрузочной способностью и обеспечивающих более низкую интенсивность изнашивания. В настоящее время все большее распространение получает развитие улучшения свойств пластичных смазок введением третьего компонента (добавки) в их состав. Введенные разнообразные твердые добавки даже в случае выдавливания смазочного материала из зоны трения частично остаются в ней и образуют разделяющий слой, снижающий площадь металлического контакта поверхностей [4–6].

В последние годы значительно возрос интерес к модифицированию смазочных материалов. Уменьшение размеров дисперсных включений приводит к качественному изменению их свойств, включая усиление межфазного взаимодействия между компонентами и матрицей смазки, а также к измельчению структуры смазки. Это обеспечивает значительно улучшенные механические и триботехнические свойства, в т.ч. при повышенных температурах и высоких контактных давлениях.

Выбор материалов для тяжело нагруженных узлов трения – сложная задача, предполагающая комплексный подход и зависящая от множества факторов: конструкции узла, условий эксплуатации (температура, нагрузка, скорость, тип движения), заявленного срока службы и экономических соображений. В контексте пластичных смазочных материалов их свойства в значительной степени определяются структурой дисперсной фазы, которая представляет собой сложный каркас, формирующийся в две основные стадии. Первая стадия включает образование первичных мицелл (центров кристаллизации) и их последующий рост до макроассоциатов определенных размеров. Вторая стадия характеризуется взаимодействием этих образующихся макроассоциатов

друг с другом, что приводит к появлению трехмерной объемной структуры, которая и придает смазке ее пластичные свойства. Эффективными модификаторами смазочных материалов являются микроразмерные добавки различной природы, способные влиять на формирование и стабильность этой структуры, а также на ее взаимодействие с трущимися поверхностями.

Широкое распространение получила многоцелевая универсальная антифрикционная комплексная литиевая смазка общего назначения ИТМОЛ-150Н, которая может использоваться как закладная в подшипниках качения закрытого типа. Она работоспособна в интервале температур от минус 40 °С до плюс 160 °С, временно до плюс 180 °С. Изготавливается с использованием в качестве дисперсионной среды индустриального масла И-40А, для загущения которого применяется комплекс из 12-гидроокси-стеариновой, ортоборной и терефталевой кислот, а их нейтрализация осуществляется гидрооксидом лития. Смазка разработана как импортозамещающая пластичная смазка серии ИТМОЛ по цене ниже аналогов на основе местного сырья [7].

Особый интерес представляет применение нитрида бора (BN) в качестве добавки в пластичных смазках. Например, гексагональный нитрид бора *h*-BN обладает уникальными трибологическими свойствами, которые делают его исключительно перспективным для применения в смазочных материалах. К ним относятся: очень низкий коэффициент трения (сравнимый с графитом и дисульфидом молибдена), высокая термическая стабильность (до 1000 °С на воздухе), превосходная химическая инертность, высокая теплопроводность и способность к образованию прочных и скользких защитных пленок на трущихся поверхностях. Ламеллярная структура *h*-BN позволяет частицам легко сдвигаться относительно друг друга, обеспечивая эффект «твердой смазки». Эти пленки могут значительно снижать прямое металлическое соприкосновение, предотвращая схватывание, уменьшая абразивное и адгезионное изнашивание, а также способствуя самовосстановлению поврежденных поверхностей. Введение микроразмерных компонентов, таких как нитрид бора, в состав комплексных литиевых смазок, например, ИТМОЛ-150Н+3% BN, направлено на снижение сопротивления трению и повышение общих эксплуатационных характеристик смазочного материала. Исследования показывают, что такие добавки могут содействовать формированию плотной гомогенной пленки на поверхности, обладающей высокой несущей способностью, и обеспечивать полировку тяжело нагруженных соединений, что в конечном итоге приводит к снижению интенсивности изнашивания и значительному увеличению долговечности узлов трения. Механизм действия микрочастиц BN включает их способность к свободному вращению в смазке, что способствует переходу режима трения скольжения в режим трения качения, а также деформационно упрочить поверхностный слой материалов соединения, повышая их устойчивость к пластическим деформациям и усталости [8].

Поэтому целью данной работы являлись исследования износостойкости пары трения скольжения, эксплуатируемой с использованием комплексной литиевой смазки общего назначения с добавлением микроразмерных компонентов в виде нитрида бора (ИТМОЛ-150Н+3% BN).

Материалы и методы. Триботехнические испытания проводили на универсальной машине трения MMW-1A вертикального типа с компьютерным управлением. Машина поддерживала в течение эксперимента постоянную нормальную силу на образец с отклонением ± 2 Н. Относительная погрешность измерения силы трения не превышала $\pm 2\%$ при жидкостном режиме смазывания.

Исследуемые образцы, моделирующие детали и материалы балансирной подвески транспортного средства были изготовлены из бронзы БрО5Ц5С5 ГОСТ 613-79 и представляли собой ролики диаметром 10 мм и высотой 15 мм. В качестве контртела был выбран диск из закаленной стали 45 диаметром 70 мм и высотой 6 мм. Перед проведением исследования для повышения точности эксперимента производили подготовку поверхности образцов. Для уменьшения шероховатости поверхности трения ее обрабатывали наждачной бумагой зернистостью Р600. Массовый износ образцов Δm (г) определяли на аналитических весах AS 60/220/C/2/N после прохождения каждых 500 м пути трения. Режимы трения при испытании образцов следующие: давление на поверхности контакта – 3 и 6 МПа; скорость скольжения – 0,1 м/с; путь трения – от 500 до 20 000 м.

В процессе испытаний фиксировали значения силы и коэффициента трения с частотой один раз в секунду с возможностью сохранения в файл. Полученные данные аккумулировали в графическом и текстовом виде и после аппроксимации подвергали анализу.

Обработка экспериментальных данных проводилась с использованием различных математических редакторов.

Результаты исследований и их обсуждение. По результатам экспериментальных исследований для полинома четвертой степени (1) были рассчитаны коэффициенты, что позволило определить массовый износ в любой точке пути трения (таблица 1):

$$\Delta m_{\text{н}} = k_1 + k_2 L + k_3 L^2 + k_4 L^3 + k_5 L^4, \quad (1)$$

где L – путь трения, м;

$k_{1,2,\dots,5}$ – коэффициенты полинома;

$\Delta m_{\text{н}}$ – массовый износ, г.

Таблица 1. – Коэффициенты полинома для пластичных смазочных материалов при расчете массового износа

		Давление, МПа	Коэффициенты			
			k_1	k_2	k_3	k_4
ИТМОЛ-150Н	ролик	3	0,0002	-9×10^{-10}	-1×10^{-13}	3×10^{-17}
		6	-3×10^{-4}	9×10^{-7}	-1×10^{-10}	$6,27 \times 10^{-15}$
	контртело	3	-6×10^{-4}	-2×10^{-7}	3×10^{-11}	$-1,3 \times 10^{-15}$
		6	0,0015	-1×10^{-6}	2×10^{-10}	$-6,9 \times 10^{-15}$
ИТМОЛ-150Н+BN	ролик	3	4×10^{-5}	-2×10^{-8}	2×10^{-11}	$-1,1 \times 10^{-15}$
		6	0,0002	2×10^{-7}	-8×10^{-12}	0
	контртело	3	0,0012	1×10^{-6}	-2×10^{-10}	$5,72 \times 10^{-15}$
		6	-0,013	2×10^{-6}	1×10^{-12}	$-2,7 \times 10^{-15}$
Литол-24	ролик	3	0,003621	$5,354 \times 10^{-4}$	$6,533 \times 10^{-7}$	$2,837 \times 10^{-10}$
	контртело	6	0,003684	$4,773 \times 10^{-4}$	$-5,66 \times 10^{-7}$	$2,408 \times 10^{-10}$

По результатам экспериментальных исследований для полинома четвертой степени (2) были рассчитаны коэффициенты, что позволило определить коэффициент трения в любой точке пути трения (таблица 2):

$$f_n = k_1 + k_2 L + k_3 L^2 + k_4 L^3 + k_5 L^4, \quad (2)$$

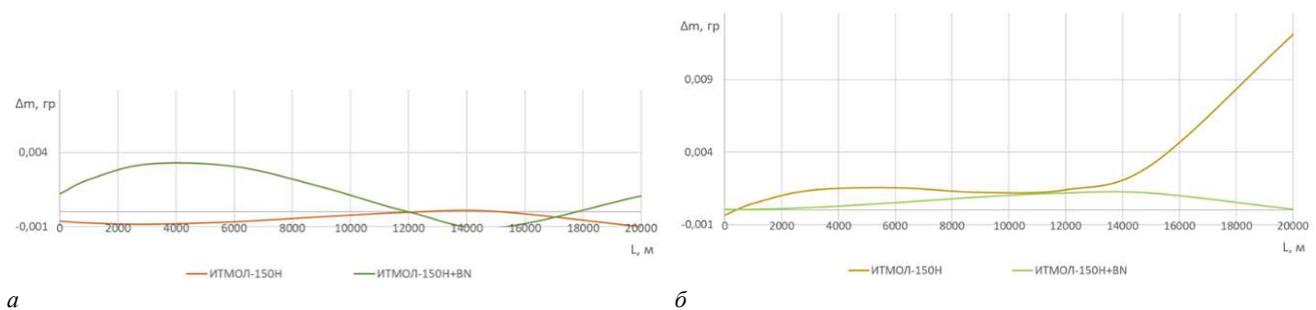
где f_n – коэффициент трения.

Таблица 2. – Коэффициенты полинома для пластичных смазочных материалов при расчете коэффициента трения

Пластичный смазочный материал	Давление, МПа	Коэффициенты				
		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
И-50	3	0,028	$-3,1 \times 10^{-6}$	$7,697 \times 10^{-10}$	$-6,65 \times 10^{-14}$	–
	6	0,041	$1,85 \times 10^{-6}$	$-6,862 \times 10^{-9}$	$5,426 \times 10^{-13}$	–
ИТМОЛ-150Н	3	0,022	$-3,5 \times 10^{-6}$	$8,39 \times 10^{-10}$	$-6,774 \times 10^{-14}$	–
	6	0,029	$-7,9 \times 10^{-6}$	$2,457 \times 10^{-9}$	$2,254 \times 10^{-13}$	–
ИТМОЛ-150Н с 3,0% BN	3	0,029	$-4,9 \times 10^{-6}$	$1,454 \times 10^{-9}$	$-1,185 \times 10^{-13}$	–
	6	0,037	$-1,1 \times 10^{-5}$	$3,148 \times 10^{-9}$	$-2,449 \times 10^{-13}$	–
Литол-24	3	0,003621	$5,354 \times 10^{-4}$	$-6,533 \times 10^{-7}$	$2,837 \times 10^{-10}$	$4,103 \times 10^{-14}$
	6	0,003684	$4,773 \times 10^{-4}$	$-5,66 \times 10^{-7}$	$2,408 \times 10^{-10}$	$-3,424 \times 10^{-14}$

Полученные графические зависимости массового износа от пути трения показывают, что введение микроразмерных компонентов в виде нитрида бора в комплексную литиевую смазку ИТМОЛ-150Н снижает массовый износ как самого образца из бронзы, так и контртела из стали 45 при различных режимах нагружения (рисунки 1 и 2).

Из рисунка 1, а следует, что при давлении 3 МПа массовый износ со смазкой ИТМОЛ-150Н+3% BN сочетается с периодом приработки и увеличивается на пути трения до 12 000 м, затем снижается и сопоставим с износом со смазкой ИТМОЛ-150Н. При давлении 6 МПа массовый износ до 12 000 м практически не отличается, а затем для образца, работающего с комплексной литиевой смазкой, начинает значительно увеличиваться.

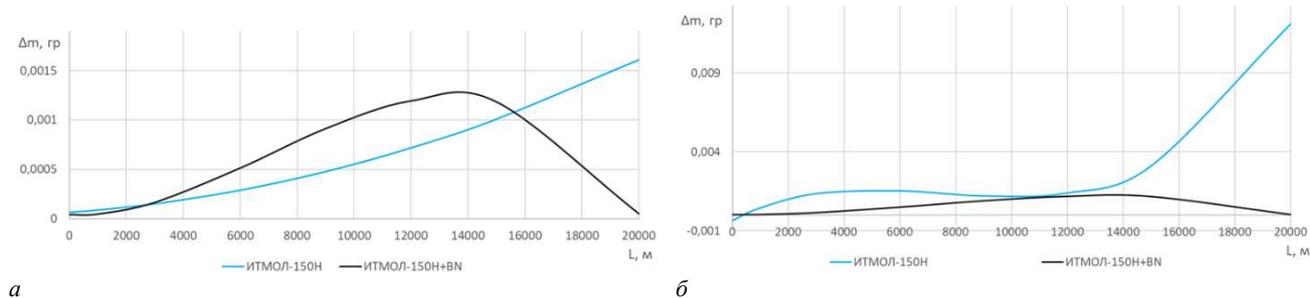


а – 3 МПа; б – 6 МПа

Рисунок 1. – Зависимость массового износа контртела Δm от пути трения L

Для образцов, изготовленных из бронзы, явно заметно снижение массового износа при эксплуатации со смазкой с добавлением нитрида бора для различных режимов нагружения (рисунок 2). При давлении 3 МПа износ увеличивается до пути трения 14 000 м, что можно объяснить вытеснением смазочного материала из зо-

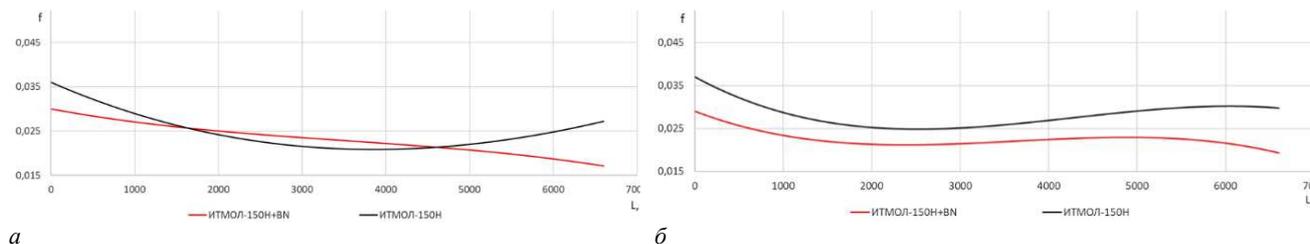
ны трения и явно выраженной приработкой, а затем снижается и менее массового износа образца со смазкой ИТМОЛ-150Н на 30–40% (рисунок 2, а). При давлении 6 МПа на всем пути трения массовый износ образцов для ПСМ с добавлением нитрида бора меньше, чем с обычной комплексной литиевой смазкой, а явно выраженной области приработки не наблюдается.



а – 3 МПа; б – 6 МПа

Рисунок 2. – Зависимость массового износа ролика Δm от пути трения L при давлении

Полученные графические зависимости коэффициента трения от пути трения при различных режимах нагружения коррелируют с графическими зависимостями массового износа от пути трения (рисунок 3). Минимальный коэффициент трения наблюдается для комплексной литиевой смазки с нитридом бора ($f = 0,030–0,033$). Период приработки для указанных ПСМ выражен незначительно, и он осуществляется на промежутке до 2000 м пути трения образца.



а – 3 МПа; б – 6 МПа

Рисунок 3. – Зависимость коэффициента трения f от пути трения L для различных смазочных материалов и давлении

Если сравнивать величину интенсивности изнашивания пары трения скольжения с традиционно используемой смазкой Литол-24, то можно увидеть, что величина износа при ее использовании в 4–5 раз выше, чем с предлагаемыми комплексными литиевыми смазками ИТМОЛ-150Н и с добавлением нитрида бора ИТМОЛ-150Н+3% ВН (рисунок 4).

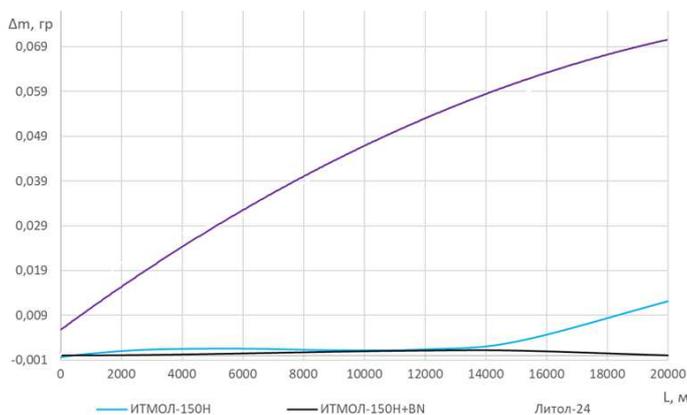


Рисунок 4. – Зависимость массового износа ролика Δm от пути трения L при давлении 6 МПа

Таким образом, модифицирование смазочных материалов частицами нитрида бора приводит к качественному изменению их свойств, что обеспечивает значительно улучшенные триботехнические свойства, в т.ч. при повышенных температурах и высоких контактных давлениях.

Заключение. На основе проведенных исследований установлено, что улучшение свойств пластичных смазок может быть достигнуто введением в ее состав модифицирующих добавок. Проведенные триботехнические испытания свидетельствуют о высоком уровне антифрикционных и противоизносных свойств предложенных смазочных материалов в условиях высоких удельных нагрузок. Исследования, смоделированные на основании условий работы тяжело нагруженных деталей балансирной подвески трехосных грузовых автомобилей МАЗ, подтвердили снижение величины износа пар трения при использовании комплексной литевой смазки с добавлением нитрида бора. Интенсивность изнашивания пары трения с традиционно используемой смазкой Литол-24 в 4–5 раз выше, чем с предлагаемыми комплексными литевыми смазками. Также для исследуемых пластичных смазочных материалов на основании полученных экспериментальных данных рассчитаны коэффициенты полинома 4-й степени, позволяющие рассчитать массовый износ и коэффициент трения на любом участке пути трения

ЛИТЕРАТУРА

1. Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение / П.А. Витязь, В.И. Жорник, А.Ф. Ильюченко и др.; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск: Беларус. навука. 2013. – 381 с.
2. Алимova З.Х. Махамаджанов М.И. Экологическая безопасность при использовании горюче-смазочных материалов / Теория и практика современной науки. – 2021. – № 11(77). – С. 12–16.
3. Алимova З.Х. Пути улучшения свойств смазочных материалов, применяемых в транспортных средствах. – Ташкент: Vneshinvestprom, 2020. – 125 с.
4. Пластичные смазки, модифицированные графеном / Э.Т. Крижевская, М.И. Сентюрихина, Р.В. Бартко и др. // Мир нефтепродуктов. – 2020. – № 6. – С. 62–63.
5. Иванов В.П., Дудан А.В., Вигерина Т.В. Триботехническое модифицирование поверхностей узлов трения в технике // Актуальные проблемы развития экономики и управления в современных условиях: сб. материалов IV Междунар. науч.-практ. конф. / Москва (10 нояб. 2021 г.) // Моск. экон. ин-т. – М.: МЭИ, 2021. – С. 328–336.
6. Структура и свойства комплексной сульфонат-кальциевой смазки / В.И. Жорник, А.В. Ивахник, В.П. Ивахник и др. // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 1(42). – С. 44–50.
7. Жорник В.И. Пластичные смазочные материалы с бинарной дисперсной фазой для тяжело нагруженных узлов трения // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 12-й Междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Минск: БНТУ, 2014. – Т. 1. – С. 358.
8. Исследование структурных особенностей нитрида бора после механоактивации в атриторе и планетарной мельнице / В.Т. Сеньют, С.А., Ковалева, Т.В. Гамзелева и др. // Химия в интересах устойчивого развития. – 2016. – Т. 24, № 2. – С. 169–175.

REFERENCES

1. Vityaz', P.A., Zhornik, V.I., Il'yushchenko, A.F. & Senyut', V.T. (2013). *Nanoalmazы detonatsionnogo sinteza: poluchenie i primenenie*. Minsk: Belarus. navuka. (In Russ.).
2. Alimova, Z.Kh. & Makhamadzhanov, M.I. (2021). *Ekologicheskaya bezopasnost' pri ispol'zovanii goryuche-smazochnykh materialov* [Environmental safety in use flammable lubricants]. *Teoriya i praktika sovremennoi nauki*, 11(77), 12–16. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Alimova, Z.Kh. (2020). *Puti uluchsheniya svoystv smazochnykh materialov, primenyaemykh v transportnykh sredstvakh*. Tashkent: Vneshinvestprom. (In Russ.).
4. Krizhevskaya, E.T., Sentyurikhina, M.I., Bartko, R.V. & Danilov, A.M. (2020). *Plastichnye smazki, modifitsirovannye grafenom* [Graphene-modified plastic lubricants]. *Mir nefteproduktov* [World of Petroleum Products], (6), 62–63. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Ivanov, V.P., Dudan, A.V. & Vigerina, T.V. (2021). *Tribotekhnicheskoe modifitsirovanie poverkhnostei uzlov treniya v tekhnike*. In: *Aktual'nye problemy razvitiya ekonomiki i upravleniya v sovremennykh usloviyakh: sb. materialov IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 10 noyab. 2021 g.* (328–336). Moscow: MEI. (In Russ.).
6. Zhornik, V.I., Ivakhnik, A.V., Ivakhnik, V.P. & Zapol'skii, A.V. (2018). *Struktura i svoistva kompleksnoi sul'fonat-kal'tsievoi smazki* [Structure and Properties of Complex Sulfonate Calcium Greases]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 1(42), 44–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Zhornik, V.I. (2014). *Plastichnye smazochnye materialy s binarnoi dispersnoi fazoi dlya tyazhelonagruzhennykh uzlov treniya*. In: *Nauka – obrazovaniyu, proizvodstvu, ekonomike: materialy 12-i Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.*: in 4 vol. Vol. 1 (358). Minsk: BNTU. (In Russ.).
8. Senyut', V.T., Kovaleva, S.A., Gamzeleva, T.V. & Grigor'eva, T.F. (2016). *Issledovanie strukturnykh osobennostei nitrida bora posle mekhanoaktivatsii v attritore i planetarnoi mel'nitse*. *Khimiya v interesakh ustoichi-vogo razvitiya*, 24(2), 169–175. (In Russ.).

Поступила 11.07.2025

**INCREASING THE ANTIFRICTION PROPERTIES OF PLASTIC LUBRICANT
BY MODIFYING WITH MICROSIZED ADDITIVES****V. IVANOV, A. DUDAN, T. VIGERINA, S. PILIPENKO, I. PILIPENOK**
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article presents studies of wear resistance of a sliding friction pair operated with a general-purpose complex lithium grease with the addition of micro-sized components in the form of boron nitride (ITMOL-150N+3% BN). The coefficients of the fourth-degree polynomial are calculated, allowing to calculate the value of mass wear and the friction coefficient at any friction section. It is established that the wear intensity of the sliding friction pair decreases with modification of the plastic complex lithium grease ITMOL-150N with boron nitride particles, and is 4-5 times lower than the traditionally used grease Litol-24.

Keywords: *plastic lubricants, modifying additives, mass wear, vehicles.*

TOPOGRAPHIC ANALYSIS OF ACCIDENTS IN MINSK IN TERMS OF ROAD TRAFFIC ACCIDENTS INVOLVING ROUTE VEHICLES

*Ph.D. in Engineering Science, Associate Prof. D. KHODOSKIN,
V. DAUHULEVICH, A. MOROZOVA
(Belarusian State University of Transport, Gomel)*

The relevance of the topic of this article is the identification of places of concentration of road accidents at stopping points (SP) of regular passenger route transport and the development of specific proposals to reduce accidents at them. In addition, the risk of road accidents on the SP of regular passenger route transport is a socially significant problem that needs to be addressed. An increase in traffic intensity, as well as an increase in the number of vehicles on the road network of cities, leads to an increase in the tightness of interaction between road users and the emergence of road conflicts, which result in the occurrence of road accidents, while a considerable part of which falls on road accidents involving passenger transport.

Keywords: road safety, road traffic accident, regular passenger route transport, stopping point, topographic analysis, causes of accidents.

Introduction. The topographic analysis of road accidents is the main type of analysis for assessing the places of concentration of road accidents at the road network of the city and includes a set of different methods for modeling spatial data. The task of topographic analysis is to identify patterns between samples of incidents, taking into account their spatial and temporal characteristics, which can be solved using the analysis of point structures. A topographic analysis of an accident can be implemented in the following options: an accident map, a linear graph of an accident, a large-scale accident scheme. This type of analysis consists in mapping the investigated territory (city, section of the road network) of the accident sites. A road accident map is a map of the investigated territory, at the corresponding points of which symbols of road accidents are applied as they are registered. Areas of concentration of road accidents in settlements include zones of influence of conflict and linear objects – intersections, pedestrian crossings and SP – in which accidents, as a rule, are the result of conflict maneuvering or shortcomings associated with traffic management. A distinctive feature of such areas in settlements is the relatively low speed of traffic and the high intensity of conflicting participants. The length of the areas, as a rule, does not exceed 300 m. The length of the impact zone of route passenger transport SP is determined by the points of the beginning and end of the landing site, increased in each direction by 50 m. The length of the zone, in addition, can be increased by connecting with a pedestrian crossing or with an intersection¹ [1–5].

Main part. To identify the streets with the largest number of road accident concentration sites in Minsk, a topographic analysis was carried out along the existing routes served by the rolling stock of the Transport Park No. 4 branch. Figures 1-5 show the location of an accident on the map of Minsk for the period 2019-2023. Circles are plotted on the map of the area, which indicate the places where the accident occurred. The circle also indicates the severity of the consequences of an accident: completely hatched (filled) or painted red – death; half-hatched (filled in) or painted blue – wound; not shaded – material damage.

According to the topographic analysis for 2019 (Figure 1), it can be concluded that the highest concentration of road accidents is presented on the Bobrujskaja and Prityckogo streets. Prityckogo Street is one of the longest streets in Frunzenskij district of the city, its length is 6.5 km. Bobrujskaja Street is located in the central part of Minsk, in parallel to the railway section near the Central Railway Station. The length of this street is 1.3 km. Based on the difference in the lengths of these two streets, the most concentrated in terms of the number of accidents can be called Bobrujskaja Street, on which in 2019 there were 2 fatal accidents, 6 accidents with injuries and 3 accidents with material damage. Next, we will focus on these streets.

A topographic analysis of the accident rate in 2020 (Figure 2) showed that on the Bobrujskaja Street decreased the number of accidents with injuries, but the number of accidents with material damage increased. On the Prityckogo Street increased the number of accidents with material damage and injuries. Fatal accident occurred at the intersection of Prityckogo Street – Kunccevshhina Street.

In 2021 (Figure 3), the number of accidents with material damage and injuries on the Prityckogo Street decreased. Fatal accident occurred at the intersection of Prityckogo Street – Pushkina Avenue. On the Bobrujskaja Street relative to last year, the number of accidents with injuries and deaths has decreased and the number of accidents with material damage has increased.

In 2022 (Figure 4), the number of accidents increased sharply. On the Prityckogo Street there were 6 accidents with injuries and 12 accidents with material damage. On the Bobrujskaja Street number of accidents with material damage remained equal to 5 incidents, the number of accidents with injuries increased to 4.

¹ Капский Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.10. – Минск, 2013. – 194 л.

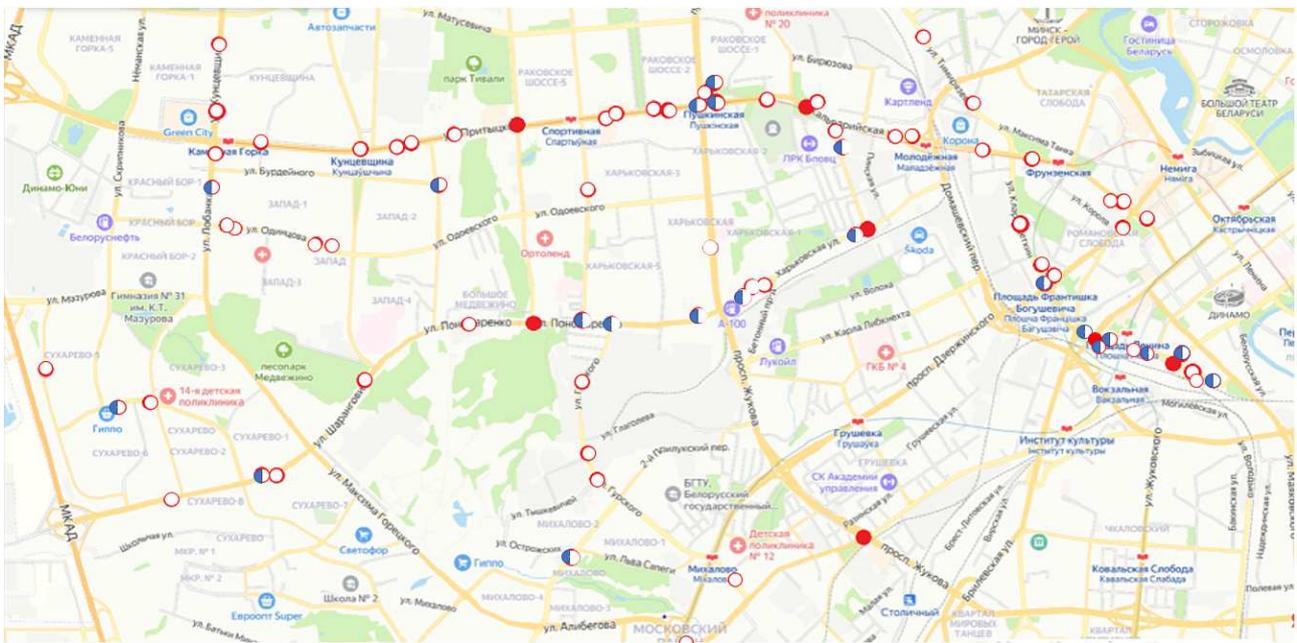


Figure 1. – Accident localization on the map of Minsk for the period January–December 2019

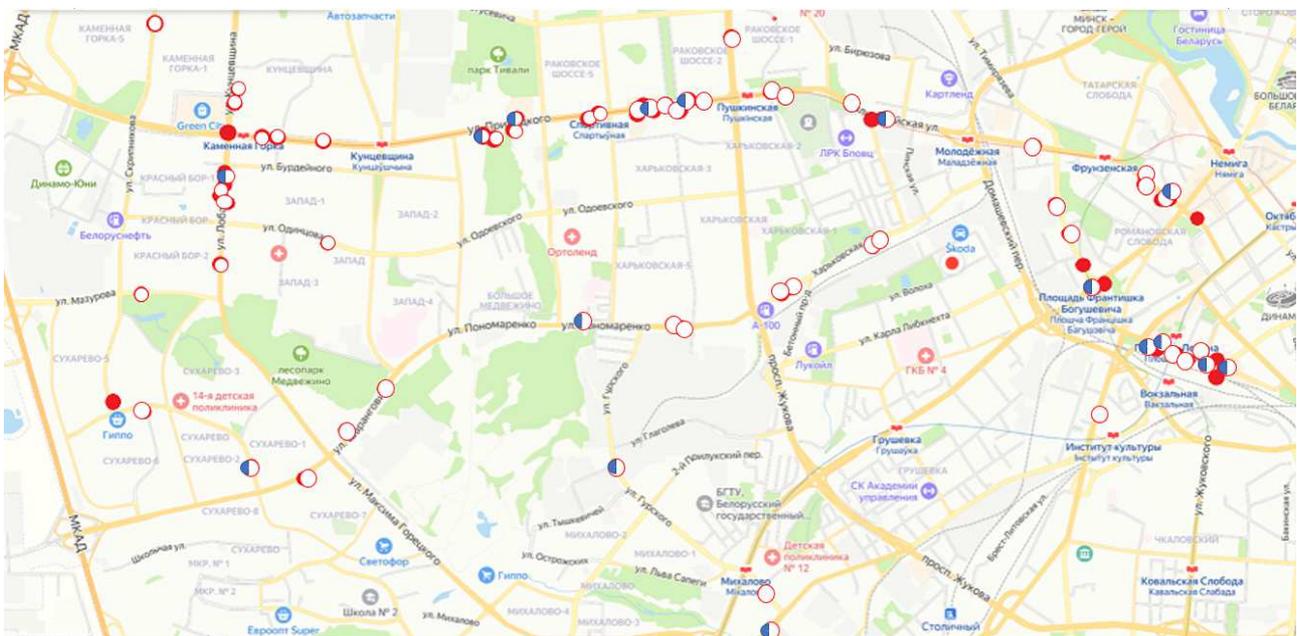


Figure 2. – Accident localization on the map of Minsk for the period January–December 2020

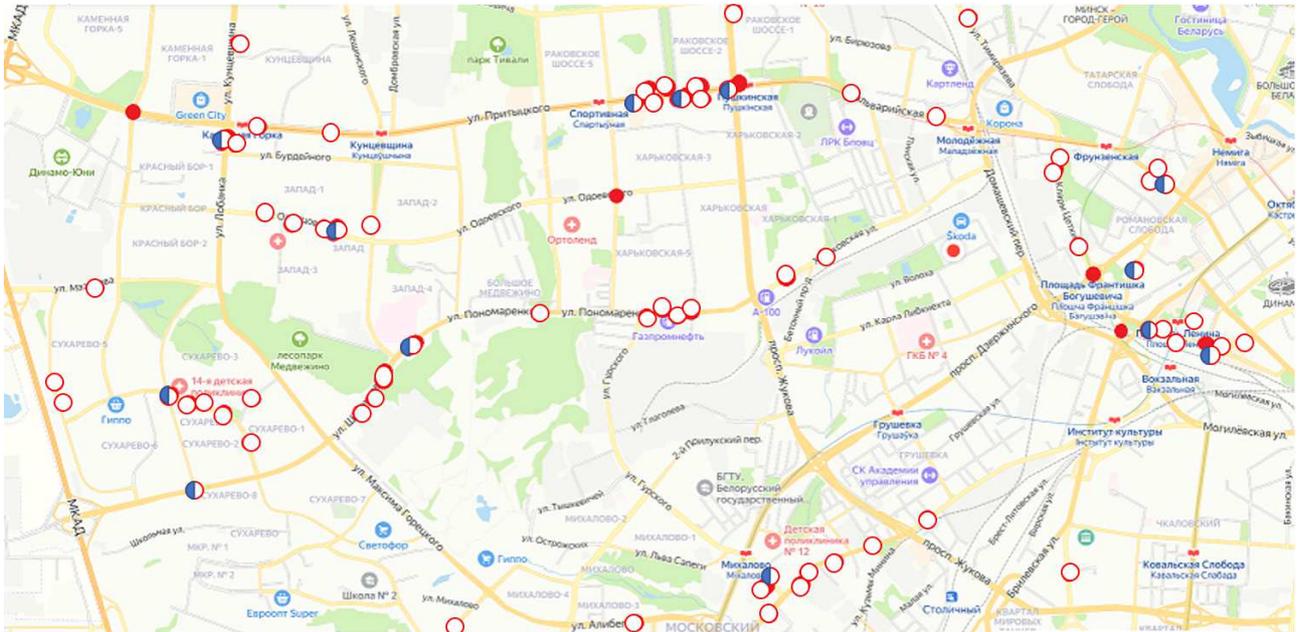


Figure 3. – Accident localization on the map of Minsk for the period January–December 2021

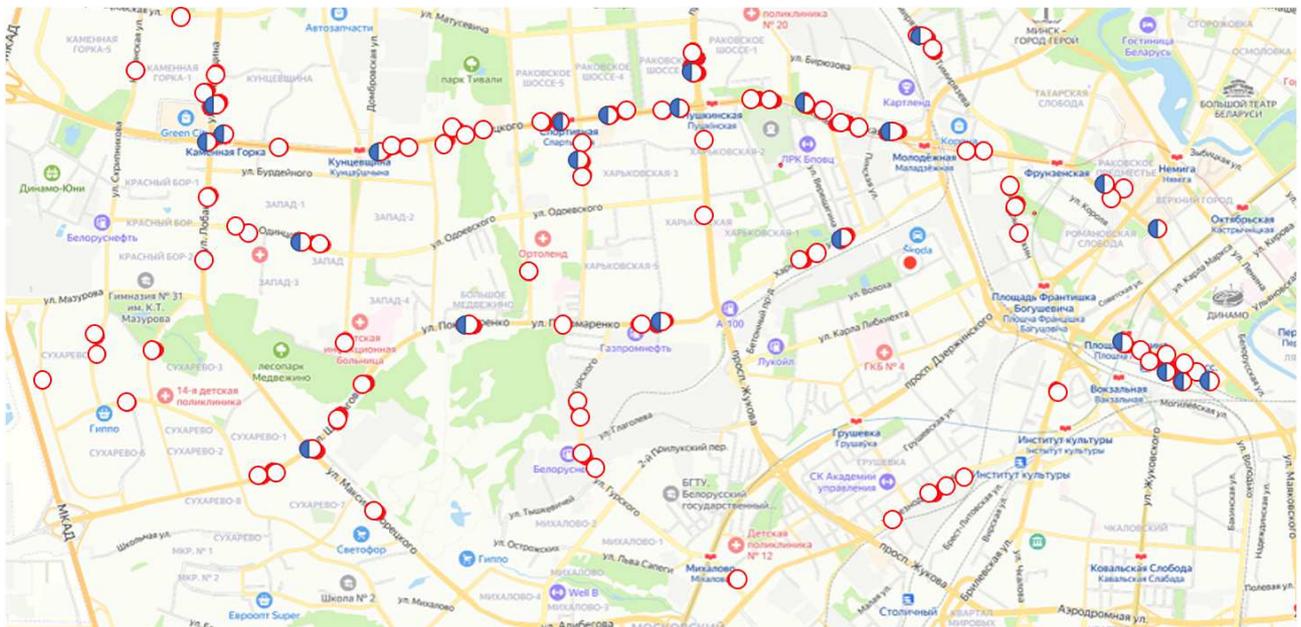


Figure 4. – Accident localization on the map of Minsk for the period January–December 2022

By 2023 (Figure 5), it was possible to reduce the total number of accidents involving route vehicles in Minsk. On the Prityckogo Street there were 5 accidents with material damage and 1 accident with injury. On the Bobrujskaja Street there were 4 accidents with material damage and 2 accidents with injuries.

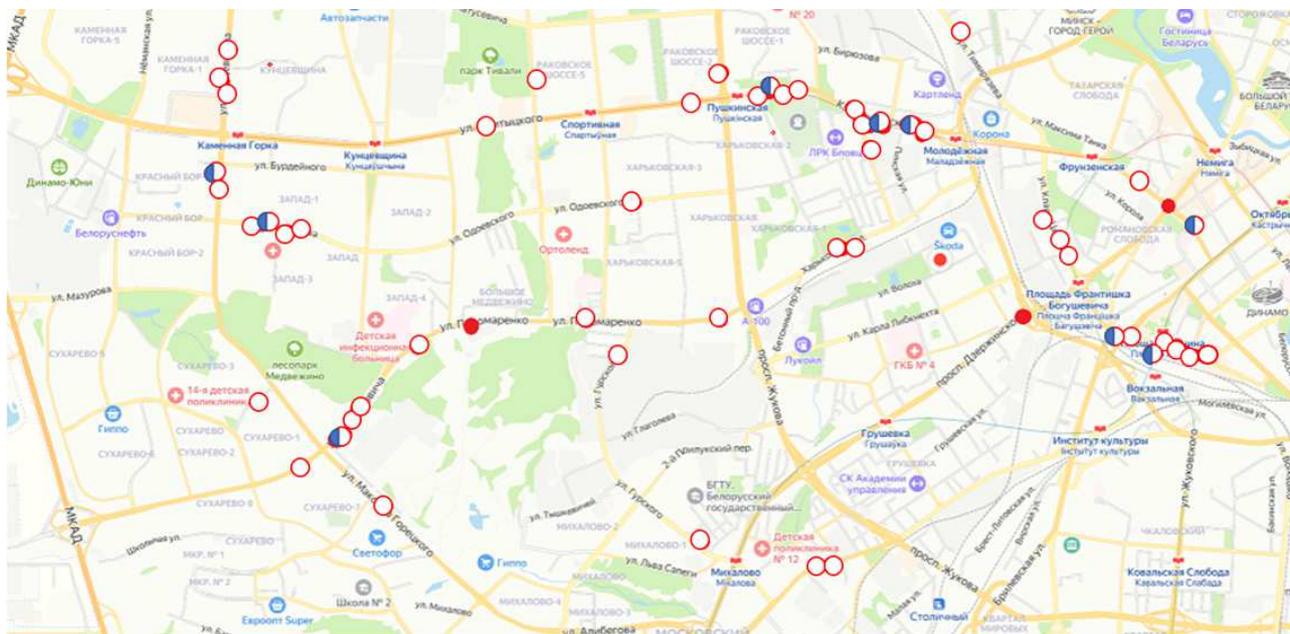


Figure 5. – Accident localization on the map of Minsk in the period January-December 2023

Based on the topographic analysis for the studied period from 2019 to 2023, it can be concluded that only with the participation of route vehicles were registered:

1. Fatal accident: the Bobrujskaja Street – 5 accidents; the Prityckogo Street – 3 accidents;
2. Accident with injuries: the Bobrujskaja Street – 18 accidents; the Prityckogo Street – 16 accidents;
3. Accident with material damage: the Bobrujskaja Street – 19 accidents; the Prityckogo Street – 48 accidents.

Taking into account the length of the streets, the greatest concentration of accidents entailing serious consequences (injury and death) was identified on the Bobrujskaja Street, where the objects of mass attraction are the Central Railway Station and Central Bus Station.

The general analysis of accidents shows that the main causes of accidents are:

- 1) speeding – the driver does not have time to adequately respond to a rapidly changing road situation;
- 2) non-compliance with the requirements of road signs and traffic lights;
- 3) violation of the rules of operation of the vehicle, because of which it is in unsatisfactory condition;
- 4) non-observance of the distance between moving vehicles;
- 5) improper maneuvering: when overtaking with leaving the oncoming lane, when avoiding obstacles or standing vehicles, when crossing intersections (especially roundabouts), when advancing with moving to the leftmost lane, when rebuilding, etc.;
- 6) non-compliance with the work and rest regime;
- 7) insufficient professional training, little experience in driving a vehicle.

Conclusion. The main causes of road accidents caused by drivers of urban passenger transport are non-observance of a safe distance and lateral interval, violation of the rules for maneuvering and passing intersections, incorrect choice of speed and inattention.

Another reason is the irresponsibility of drivers. Many accidents occur due to the fault of drunk drivers. However, now in the Republic of Belarus, the number of accidents committed while intoxicated by drivers is decreasing. At the moment, the Republic of Belarus has one of the toughest measures of responsibility for drunk driving, in comparison with neighboring countries and other CIS states.

An important thing is the violation of the speed limit. The higher the speed, the more serious the consequences of an accident. The situation of a collision with an SP can be, both when the driver does not cope with the control, and when he himself becomes injured due to the fault of another participant in the movement, and in case of unsatisfactory technical condition of the car. Video cameras are designed to deal with gross violations of the speed limit.

Another problem is the correct location and equipment of the SP themselves. The equipment of SP with landing sites, pavilions, racks for the installation of stop signs, etc., as well as the maintenance of sites and structures should be carried out by the owners of roads and streets. Current repair of public transport on the Bobrujskaja Street, which

belongs to the Oktyabrskij and Moskovskij districts of Minsk, is under the economic jurisdiction of unitary enterprise “Remavtodor of the Oktyabrskij district of Minsk” and unitary enterprise “Remavtodor of the Moskovskij district of Minsk”, respectively (as well as the replacement of stopping pavilions).

The main document regulating the parameters of the landing site is CS 3.03.06-2022 “Construction standards of the Republic of Belarus. Streets of settlements”, approved and put into effect by decree of the Ministry of Architecture and Construction of 25.03.2022 No.39. This regulatory document spelled out the main necessary parameters for the arrangement of SP buses and (or) trolleybuses and trams. Regarding the equipment of waiting pavilions, the document regulating their arrangement is the “List with requirements for standard stopping pavilions, benches, refuse bins and other small architectural forms for Minsk”. Waiting pavilions are located at a distance of at least 3 m from the side of the carriageway. However, this rule is not observed everywhere – often due to cramped conditions, SPs are located much closer to the roadway. The prescribed 3 m will not be able to protect people waiting for transport from a car flying onto the sidewalk. By standards, the waiting pavilion should be equipped with^{2,3}:

- road signs indicating the place of stopping vehicles, in accordance with the traffic rules;
- linear transport route indicators;
- seats for passengers;
- glazed information boards for posting information on the operation of ground urban passenger transport;
- glazed panels for placing advertising products.

On SP, the dimensions of which do not allow placing pavilions of standard structures, small architectural forms are installed (benches, plates with a schedule).

Sidewalks in the city are protected by high curbs, trees or shrubs, columns limiting the arrival of cars. Stopping places of regular passenger route transport are not protected by anything other than a road curb, which in some places is located lower than usual for the convenience of passengers and is practically not an obstacle for cars. Thus, it turns out that modern SPs are responsible for the comfort and awareness of passengers, but not for their safety.

Thus, one of the most emergency streets is the Bobrujskaja street in Minsk, namely the places of concentration of road accidents located in the SP districts along this street. It houses auto and railway stations, which are visited daily by a huge number of people from other cities and countries. Thus, SPs within train stations are crowded places where a large number of passengers are simultaneously awaiting the arrival of public transport. Such passenger traffic on the SP should correspond to both the number of public transport and the route schedule (frequency of their arrival). Thus, at peak hours, SP along the Bobrujskaja street becomes a zone of increased danger.

An accident at public transport stops is a tragedy that affects not only the injured passengers, but also the entire infrastructure of urban traffic. Accidents at stops often result in injuries to passengers waiting for transport, as well as drivers and pedestrians nearby. Cars, infrastructure elements (stopping pavilions, traffic lights) are damaged, which requires significant costs for their restoration. After an accident, traffic on a section of the road can be difficult or completely blocked, which leads to congestion and delay in public transport. Improving the design of the SP, and most importantly the waiting area, can significantly reduce the risk of accidents at public transport stops, creating safer conditions for all road users. Understanding and compliance with traffic rules and mutual respect for drivers and pedestrians is also a guarantee of safety and prevention of such tragic incidents.

REFERENCES

1. Kapskii, D.V., Azemsha, S.A., Kuz'menko, V.N., Mozalevskii, D.V., Korzhova, A.V., Polkhovskaya, A.S. ... Skirkovskii, S.N. (2015). *Audit bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya*. Gomel: BelGUT. (In Russ.).
2. Azemsha, S.A., Kapskii, D.V. & Lapskii, S.L. (2021). *Obespechenie bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya i perevozok. Praktikum: uchebnoe posobie*. Gomel: BelGUT. (In Russ.).
3. Vrubeľ, Yu.A., Kapskii, D.V. & Kot, E.N. (2006). *Opredelenie poter' v dorozhnom dvizhenii*. Minsk: BNTU. (In Russ.).
4. Kapskii, D.V. (2010). Ochagovyi analiz avariinosti – osnova audita bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya. *Organizatsiya i bezopasnost' dorozhnogo dvizheniya v krupnykh gorodakh: sb. dokl. devyatoi mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Sankt-Peterburg (23–24 sent. 2010 g.)*. Saint Petersburg: SPbGA-SU. (In Russ.).
5. Kapskii, D.V. (2015). Povyshenie kachestva dorozhnogo dvizheniya v ochagakh avariinosti [Improvement of Road Traffic Quality in Accident Clusters]. *Nauka i tekhnika. Seriya 1. Mashinostroenie [Science & Technigie. Series 1. Mechanical engineering]*, (3), 36–43. (In Russ., abstr. in Engl.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аудит безопасности дорожного движения / Д.В. Капский, С.А. Аземша, В.Н. Кузьменко [и др.]. – Гомель: БелГУТ, 2015. – 428 с.

² СН 3.03.06-2022. Строительные нормы Республики Беларусь. Улицы населенных пунктов: утв. постановлением М-ва архитектуры и стр-ва от 25 марта 2022 г. № 39. – Минск: Минстройархитектуры, 2022. – 56 с.

³ СН 3.03.02-2019. Строительные нормы Республики Беларусь. Трамвайные и троллейбусные линии: утв. постановлением М-ва архитектуры и стр-ва от 16 дек. 2019 г. № 69. – Минск: Минстройархитектуры, 2020. – 61 с.

2. Аземша С.А., Капский Д.В., Лапский С.Л. Обеспечение безопасности дорожного движения и перевозок. Практикум: учеб. пособие / М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь. гос. ун-т трансп. – Гомель: БелГУТ, 2021 – 110 с.
3. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.
4. Капский Д.В. Очаговый анализ аварийности - основа аудита безопасности дорожного движения // Организация и безопасность дорожного движения в крупных городах: сб. докл. девятой междунар. науч.-практ. конф. / Санкт-Петербург (23–24 сент. 2010 г.). – СПб.: СПбГА-СУ, 2010. – С. 498–503.
5. Капский Д.В. Повышение качества дорожного движения в очагах аварийности // Наука и техника. Сер. 1. Машиностроение. – 2015. – № 3 – С. 36–43.

Поступила 18.07.2025

ТОПОГРАФИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНОСТИ В Г. МИНСКЕ В РАЗРЕЗЕ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ АВАРИЙНОСТИ С УЧАСТИЕМ МАРШРУТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

**канд. техн. наук, доц. Д.П. ХОДОСКИН, О.А. ДОВГУЛЕВИЧ, А.В. МОРОЗОВА
(Белорусский государственный университет транспорта, Гомель)**

Актуальность темы данной статьи состоит в выявлении очагов аварийности на остановочных пунктах (ОП) маршрутного пассажирского транспорта регулярного сообщения и выработка конкретных предложений по снижению аварийности на них. Кроме того, риск дорожно-транспортных происшествий на ОП маршрутного пассажирского транспорта является социально значимой проблемой, требующей решения. Рост интенсивности дорожного движения, а также увеличение численности транспортных средств на улично-дорожной сети городов приводит к повышению тесноты взаимодействия участников дорожного движения и возникновению дорожных конфликтов, следствием которых является возникновение дорожно-транспортных происшествий, при этом немалая часть из которых приходится на дорожно-транспортные происшествия с участием пассажирского транспорта.

Ключевые слова: *безопасность дорожного движения, дорожно-транспортное происшествие, маршрутный пассажирский транспорт регулярного сообщения, остановочный пункт, топографический анализ, причины аварийности.*

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 331.452

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-72-80

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ НА ПРОИЗВОДСТВЕ
В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА, А.В. СУНЦОВ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Выполнен сравнительный анализ динамики несчастных случаев на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более в Республике Беларусь и Российской Федерации. С помощью методов корреляционного анализа подтверждена отрицательная линейная связь между коэффициентами частоты и тяжести травматизма на предприятиях за период 2001–2024 гг. Определены специфические особенности распределения показателей производственного травматизма в Республике Беларусь за период 2018–2024 гг. по территориальному признаку, гендерным различиям, профессии, возрасту и стажу работы, видам деятельности, факторам травмирования и их причинам.

Ключевые слова: несчастный случай на производстве, производственный травматизм, охрана труда.

Введение. По данным Международной организации труда ежегодно в мире регистрируется более 2,3 млн летальных исходов в результате несчастных случаев на производстве или профессиональных заболеваний (около 6 000 случаев ежедневно), а количество травм и увечий на рабочем месте насчитывает более 340 млн, развивается около 160 профессиональных заболеваний [1]. Вопросам обеспечения безопасности и охраны труда, снижения уровня травм и заболеваний, связанных с неблагоприятными и опасными условиями, в Республике Беларусь придается приоритетное значение. Они определяют основные направления социальной политики государства [2–6]. Необходимость всестороннего анализа причин производственного травматизма и профессиональной заболеваемости закреплена на законодательном уровне, в частности, в Законе Республики Беларусь «Об охране труда» № 356-3 от 23.06.2008 г. статьей 9 для республиканских органов государственного управления и иных государственных организаций, подчиненных Правительству Республики Беларусь; статьей 10 для местных исполнительных и распорядительных органов; статьей 17 для работодателей, в связи с тем, что результаты анализа статистических данных о происшествиях являются индикаторами эффективности функционирования систем управления охраной труда.

Методы исследований. По официальным данным Белстата и Росстата выполнен сравнительный статистический анализ динамики несчастных случаев на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более в Республике Беларусь и Российской Федерации за период 2001–2024 гг. Данные методы позволяют изучить фактические показатели состояния производственного травматизма, сопоставить их по годам с целью выявления общих тенденций изменения. С помощью методов корреляционного анализа определена связь между коэффициентами частоты и тяжести травматизма на предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации за период 2001–2024 гг. Выполненный анализ официальных статистических данных Департамента государственной инспекции труда Минтруда и соцзащиты Республики Беларусь за период 2018–2024 гг. позволил определить специфические особенности распределения показателей производственного травматизма в Республике Беларусь.

Результаты и их обсуждение. Проанализирована динамика несчастных случаев на производстве в Республике Беларусь и Российской Федерации за период 2001–2024 гг. На рисунке 1 приведено количество работников, потерпевших от производственного травматизма без смертельного исхода на 1000 работающих, на рисунке 2 – со смертельным исходом на 1000 работающих^{1,2,3}.

В целом, за период 2001–2024 гг. отмечается тенденция линейного снижения коэффициентов частоты производственного травматизма как в Республике Беларусь (по травмам без смертельного исхода $R^2 = 0,7265$,

¹ Условия труда, производственный травматизм (по отдельным видам экономической деятельности) [Электронный ресурс]. – URL: https://rosstat.gov.ru/working_conditions (дата обращения: 26.04.2025).

² Травматизм – 2023. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/4939-travmatizm-2023-itogi?ysclid=m9uscw7m6ax217454805> (дата обращения: 26.04.2025).

³ Охрана труда и травматизм в Республике Беларусь 2024 года. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/5102-okhrana-truda-i-travmatizm-v-respublike-belarus-2024-goda-itogi?ysclid=m9yd40cp53688257600> (дата обращения: 26.04.2025).

со смертельным исходом $R^2 = 0,7838$), так и в Российской Федерации (по травмам без смертельного исхода $R^2 = 0,8801$, со смертельным исходом $R^2 = 0,9409$), что подтверждает достаточную эффективность проводимой двадцатипятилетней политики стран в области охраны труда. Уровень травматизма на производстве за рассматриваемый период снизился в Российской Федерации приблизительно в 2,8 раза с летальным исходом и в 5,1 раза без летального исхода, в Республике Беларусь соответственно – 2,2 и 4,1 раза. Следует отметить, что усредненный за рассматриваемый период уровень производственного травматизма в Республике Беларусь ниже, чем в Российской Федерации в 2,2 раза с летальным исходом и в 2,8 раза без летального исхода. Однако в Республике Беларусь с 2017 по 2024 гг. отмечается тенденция роста числа работников, потерпевших при несчастных случаях на производстве без смертельного исхода – с 39 до 51 чел. на 100 000 работающих, а со смертельным исходом с 2 до 3 чел. на 100 000 работающих. Таким образом, в последние годы наблюдения вероятность гибели на производстве в Республике Беларусь составляет $3 \cdot 10^{-5}$, в Российской Федерации – $5 \cdot 10^{-5}$.

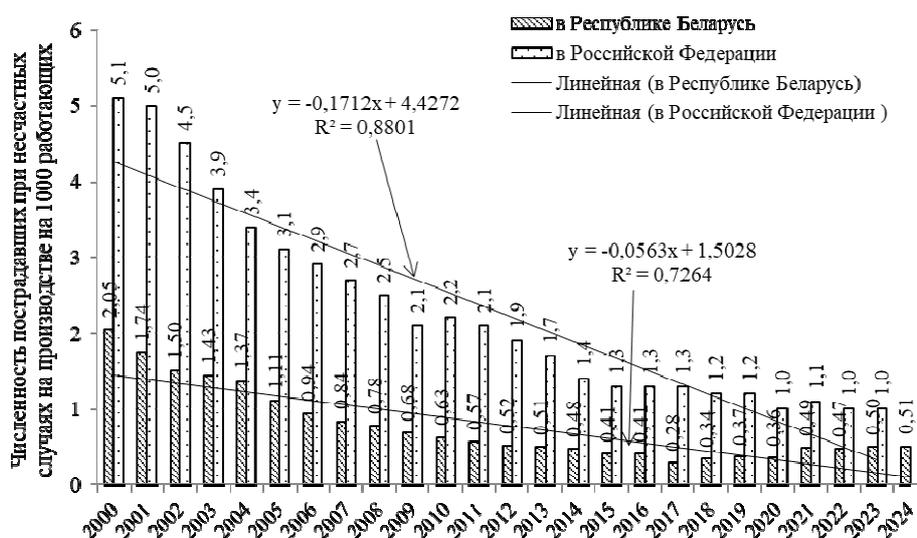


Рисунок 1. – Численность работников, потерпевших при несчастных случаях на производстве без смертельного исхода на 1000 работающих (по данным Белстата и Росстата) за период 2001–2024 гг.

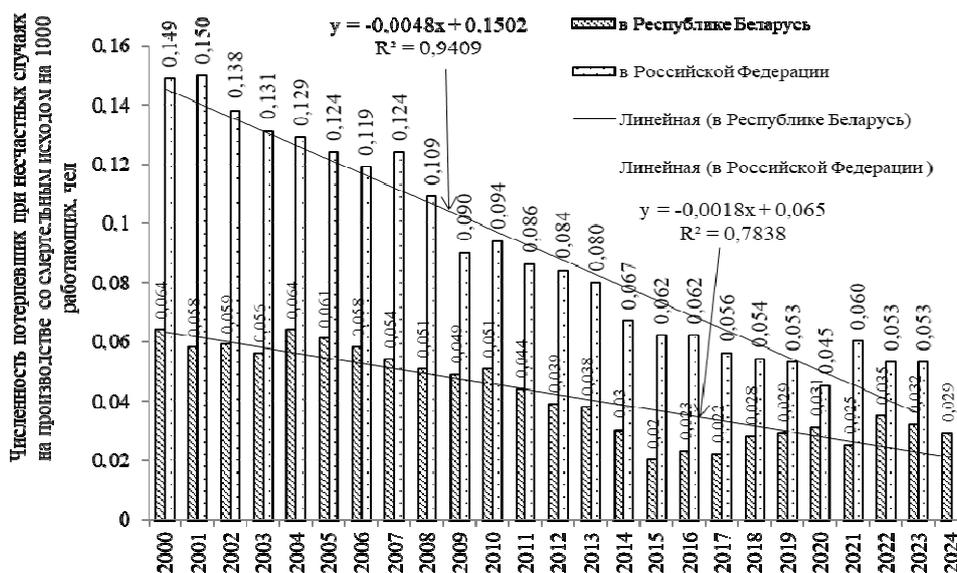


Рисунок 2. – Численность работников, потерпевших при несчастных случаях на производстве со смертельным исходом на 1000 работающих (по данным Белстата и Росстата) за период 2001–2024 гг.

В ряде европейских стран подобные уровни риска являются недопустимыми. К примеру, парламентом в Нидерландах в качестве государственного закона, исходя из экономических и социальных возможностей страны, установлена приемлемая обществом вероятность смерти в течение года для граждан от опасностей, связанных с работой, на уровне менее 10^{-6} .

На рисунке 3 приведена динамика количества потерянных рабочих дней в случае временной нетрудоспособности на одного пострадавшего от производственной травмы за период 2001–2023 гг.

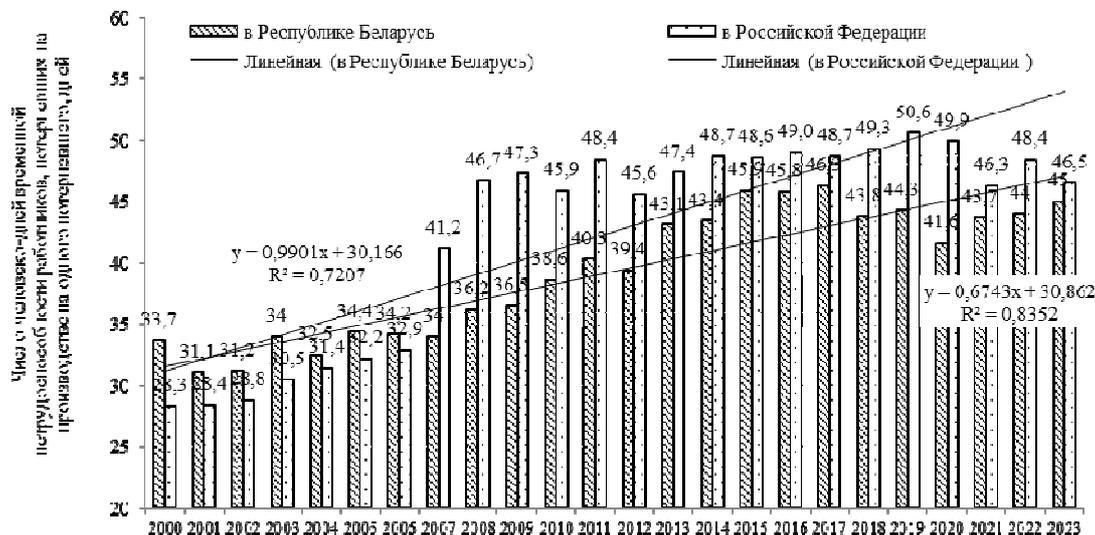


Рисунок 3. – Число человеко-дней временной нетрудоспособности работников, потерявших на производстве, в расчете на одного потерпевшего в днях (по данным Белстата и Росстата) за период 2001–2023 гг.

За период 2001–2023 гг. отмечается тенденция линейного роста коэффициентов тяжести производственного травматизма как в Республике Беларусь ($R^2 = 0,8352$), так и в Российской Федерации ($R^2 = 0,7207$). В целом, сравнительный анализ основных относительных статистических показателей в области охраны труда – коэффициентов частоты (см. рисунок 1) и тяжести (см. рисунок 3) травматизма на предприятиях Республики Беларусь и Российской Федерации показывает, что на фоне постоянного снижения коэффициентов частоты постоянно растет коэффициент тяжести производственного травматизма, при этом установлена высокая обратная корреляционная связь (парные коэффициенты корреляции составляет «минус» 0,8581 для Республики Беларусь и «минус» 0,9298 для Российской Федерации) (при уровне значимости $\alpha = 0,05$). Это указывает на то, что за исследуемый период на фоне постоянного снижения травматизма резко возросла его тяжесть, что возможно обусловлено меньшим учетом травм с легкой степенью тяжести.

Выполнен углубленный анализ состояния производственного травматизма за период 2018–2024 гг. по официальным статистическим данным Департамента государственной инспекции труда Минтруда и соцзащиты Республики Беларусь. Гендерное распределение производственного травматизма за период 2018–2024 гг. приведено в таблице 1^{4,5}.

Таблица 1. – Гендерное распределение производственного травматизма в Республике Беларусь

Пол	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
Процент от их общего количества работников, потерпевших на производстве, %							
Мужчины	77,5	75,1	78,1	77,4	74,7	74,3	74,1
Женщины	22,5	24,9	21,9	22,6	25,3	25,3	25,9
Из них со смертельным исходом, %							
Мужчины	92,2	92,9	94,2	95,5	91,7	95,7	96,2
Женщины	7,8	7,1	5,8	4,5	8,3	4,3	3,8

Распределение производственного травматизма по полу показало, что у мужчин шансы получить травму на работе в 3,2 раза выше, чем у женщин (из них со смертельным исходом у мужчин выше в 15,8 раза). Сред-

⁴ Травматизм – 2023. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/4939-travmatizm-2023-itogi?ysclid=m9ucw7m6ax217454805> (дата обращения: 26.04.2025).

⁵ Охрана труда и травматизм в Республике Беларусь 2024 года. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/5102-okhrana-truda-i-travmatizm-v-respublike-belarus-2024-goda-itogi?ysclid=m9yd40cp53688257600> (дата обращения: 26.04.2025).

ненный за период наблюдения 2018–2024 гг. показатель позволил установить, что удельный вес среди травмированных мужчин составляет 75,9% (из них со смертельным исходом 94,1%), что может быть обусловлено их более высокой склонностью к риску, а также преобладанием доли тяжелого физического, а значит, более травмоопасного труда. Результаты топографического анализа количества пострадавших от несчастных случаев на производстве в Республики Беларусь приведены на рисунке 4 (общее количество) и рисунке 5 (со смертельным исходом)^{6, 7}.

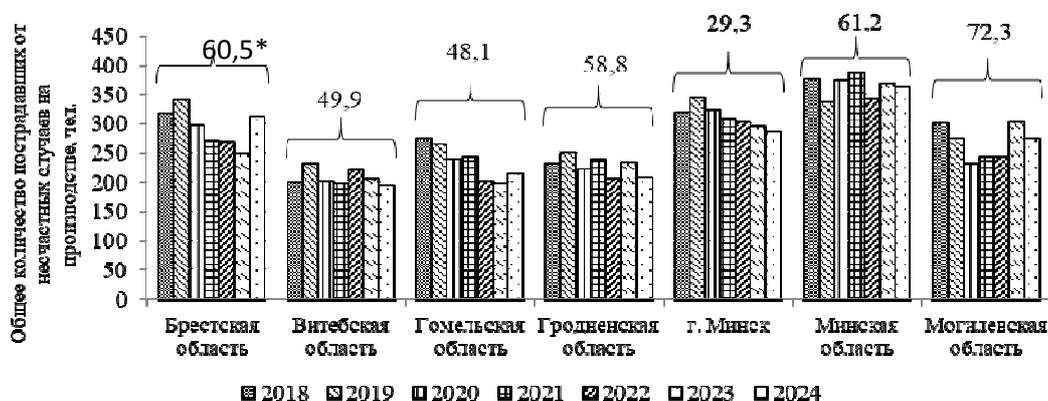


Рисунок 4. – Общая численность пострадавших в результате несчастных случаев на производстве:
* с усредненным коэффициентом частоты производственного травматизма на 100 тыс. работников

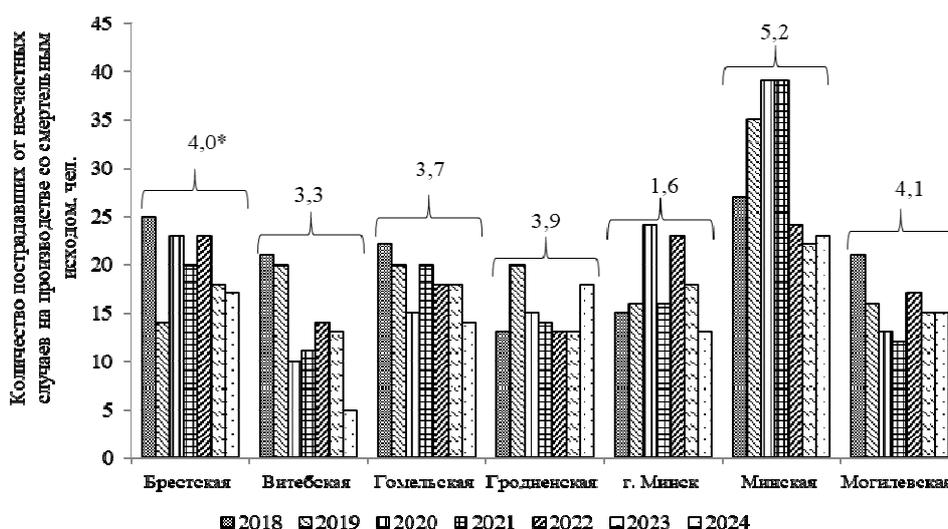


Рисунок 5. – Численность летально пострадавших в результате несчастных случаев на производстве:
* с усредненным коэффициентом частоты производственного травматизма на 100 тыс. работников

При сравнении ранговых позиций распределения производственного травматизма по территориальному признаку выявлено, что наибольшее количество как всех несчастных случаев на производстве (более 360 случаев), так и с летальным исходом (около 30 случаев) ежегодно регистрируется в Минской области, однако относительный показатель – усредненный за период наблюдения коэффициент частоты производственного травматизма на 100 тыс. работников – позволил установить, что наиболее высок риск травмирования на производстве в Могилевской области (72 чел. против 59 чел. на 100 тыс. работников в Минской области). А лидирует по коэффициенту частоты производственного травматизма с летальным исходом Минская область (около 5 чел. на 100 тыс. работников), превышая средний уровень по всей республике в 1,5 раза.

⁶ Травматизм – 2023. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/4939-travmatizm-2023-itogi?ysclid=m9ucw7m6ax217454805> (дата обращения: 26.04.2025).

⁷ Охрана труда и травматизм в Республике Беларусь 2024 года. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/5102-okhrana-truda-i-travmatizm-v-respublike-belarus-2024-goda-itogi?ysclid=m9yd40cp53688257600> (дата обращения: 26.04.2025).

Результаты динамики распределения численности работающих, пострадавших в результате несчастных случаев на производстве по видам экономической деятельности за период 2018–2024 гг. приведены в таблицах 2 и 3^{8,9}.

Таблица 2. – Динамика распределения общей численности пострадавших от производственного травматизма по видам экономической деятельности за период 2018–2024 гг.^{8,9}

Вид деятельности	Всего/ процент от их общего количества						
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
В целом по Беларуси	2020/100,0	2042/100,0	1889/100,0	1 886/100	1 781/100	1850/100	1849/100
промышленность	634/31,4	658/32,2	590/31,2	583/30,9	539/30,3	595/32,2	540/29,2
растениеводство и животноводство, охота	401/19,9	443/21,7	462/24,5	365/19,4	423/23,8	429/23,2	430/23,3
строительство	304/15,0	300/14,7	268/14,2	263/13,9	219/12,3	237/12,8	243/13,1
транспортная деятельность, складирование, почтовая и курьерская деятельность	158/7,8	136/6,7	120/6,4	144/7,6	149/8,4	131/7,1	136/7,4
оптовая и розничная торговля, ремонт автомобилей и мотоциклов	76/3,8	124/6,1	108/5,7	139/7,4	95/5,3	115/6,2	116/6,3
здравоохранение и социальные услуги	41/2,0	65/3,1	46/2,4	58/3,1	56/3,1	63/3,4	76/4,1
образование	48/2,4	65/3,1	32/1,7	38/2,0	44/2,5	34/1,8	50/2,7
лесоводство и лесозаготовки	64/3,2	72/3,5	62/3,3	56/3,0	41/2,3	33/1,8	45/2,4
снабжение электроэнергией, газом, паром, горячей водой и кондиционированным воздухом	44/2,2	37/1,8	63/3,3	52/2,8	40/2,2	48/2,6	37/2,0
водоснабжение, сбор, обработка и удаление отходов, деятельность по ликвидации загрязнений	29/1,4	31/1,5	21/1,1	40/2,1	19/1,1	21/1,1	27/1,5
прочие виды деятельности	221/10,9	111/5,4	117/6,2	148/7,8	156/8,7	141/7,6	149/7,7

Таблица 3. – Динамика распределения количества пострадавших от производственного травматизма со смертельным исходом по видам экономической деятельности за период 2018–2024 гг.^{8,9}

Вид деятельности	Со смертельным исходом/ процент от их общего количества						
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
В целом по Беларуси	144/100	141/100	139/100	132/100	132/100	117/100	105/100
промышленность	31/21,5	30/21,3	26/18,7	26/19,7	26/19,7	24/20,5	18/17,1
растениеводство и животноводство, охота	26/18,1	37/26,2	32/23,0	28/21,3	29/22,0	25/21,4	25/23,8
строительство	30/20,8	25/17,7	41/29,5	26/19,7	25/18,9	31/26,5	28/26,7
транспортная деятельность, складирование, почтовая и курьерская деятельность	15/10,4	13/9,2	11/7,9	25/18,9	23/17,4	18/15,4	14/13,3
оптовая и розничная торговля, ремонт автомобилей и мотоциклов	–	8/5,7	2/1,4	5/3,8	3/2,3	5/4,3	6/5,7
здравоохранение и социальные услуги	–	2/1,4	3/2,2	1/0,8	–	–	–
образование	2/1,4	2/1,4	2/1,4	–	2/1,5	1/0,9	1/1,0
лесоводство и лесозаготовки	13/9,0	10/7,1	8/5,8	10/7,6	4/3,0	3/2,7	6/5,7
снабжение электроэнергией, газом, паром, горячей водой и кондиционированным воздухом	7/4,9	2/1,4	6/4,3	5/3,8	4/3,0	6/5,1	–
водоснабжение, сбор, обработка и удаление отходов, деятельность по ликвидации загрязнений	3/2,1	3/2,1	1/0,7	3/2,3	4/3,0	1/0,9	–
прочие виды деятельности	17/11,8	9/6,5	7/5,0	3/2,1	129,2	3/2,7	7/6,7

⁸ Травматизм – 2023. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/4939-travmatizm-2023-itogi?ysclid=m9uscw7m6ax217454805> (дата обращения: 26.04.2025).

⁹ Охрана труда и травматизм в Республике Беларусь 2024 года. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/5102-okhrana-truda-i-travmatizm-v-respublike-belarus-2024-goda-itogi?ysclid=m9y40cp53688257600> (дата обращения: 26.04.2025).

Динамика распределения количества пострадавших от производственного травматизма за период 2018–2024 гг. по видам экономической деятельности показала стабилизацию ранговых позиций: наиболее высокий уровень абсолютных показателей регистрируются в промышленности, вторую позицию занимают растениеводство, животноводство и охота, третью – строительство (данный вид деятельности на первой позиции по травмам с летальным исходом в последние годы наблюдения).

Но относительный показатель – усредненный коэффициент частоты производственного травматизма на 100 тыс. работников – позволил установить, что наиболее высок риск травмирования при выполнении таких видов деятельности, как сельское, лесное и рыбное хозяйство (145 чел. на 100 тыс. работников и со смертельным исходом 10 чел. на 100 тыс. работников), строительство (109 чел. на 100 тыс. работников и со смертельным исходом 13 чел. на 100 тыс. работников) и промышленность (64 чел. на 100 тыс. работников и со смертельным исходом 3 чел. на 100 тыс. работников).

Динамика распределения процента травмированных на производстве по возрастным группам в Республике Беларусь за период 2018–2024 гг. приведена в таблицах 4 и 5^{10,11}.

Таблица 4. – Динамика распределения процента от их общего количества травмированных на производстве по возрастным группам в Республике Беларусь за период 2018–2024 гг.^{10,11}

Возраст пострадавшего	Всего/ процент от их общего количества, %						
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
до 18 лет	6/0,3	12/0,6	5/0,3	10/0,5	7/0,4	15/0,8	17/0,9
с 18 до 30 лет	440/21,8	385/18,9	369/19,5	375/19,6	342/19,2	339/18,3	327/17,7
с 31 до 40 лет	425/21,0	436/21,3	414/21,9	389/20,6	347/19,5	403/21,8	367/19,8
с 41 до 50 лет	462/22,9	493/24,1	424/22,4	414/22,0	425/23,9	405/21,9	453/24,5
с 51 до 60 лет	581/28,8	577/28,3	530/28,1	530/28,1	485/27,2	529/28,6	486/26,3
старше 60 лет	106/5,2	139/6,8	147/7,8	168/8,9	175/9,8	159/8,6	199/10,8

Таблица 5. – Динамика распределения процента травмированных со смертельным исходом на производстве по возрастным группам в Республике Беларусь за период 2018–2024 гг.^{10,11}

Возраст пострадавшего	Со смертельным исходом/ процент от их общего количества, %						
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.
до 18 лет	–	–	1/0,7	–	2/1,5	1/0,9	2/1,9
с 18 до 30 лет	18/12,5	13/9,2	17/12,2	21/15,9	16/12,1	20/17,1	10/9,5
с 31 до 40 лет	37/25,7	27/19,1	27/19,4	24/18,2	23/17,4	22/18,8	24/22,9
с 41 до 50 лет	38/26,4	28/19,9	31/22,3	31/23,5	34/25,8	19/16,2	30/28,6
с 51 до 60 лет	47/32,6	57/40,4	53/38,1	39/29,5	35/26,5	41/35,0	30/28,6
старше 60 лет	4/2,8	16/11,4	10/7,3	17/12,9	22/16,7	14/12,0	9/8,6

Доминирующая возрастная группа по наиболее высокой вероятности получения как общих травм на производстве, так и с летальным исходом – от 51 до 60 лет, что обусловлено потерей ощущения остроты опасности в данном возрасте, ухудшением скорости реакции, переоценкой своих возможностей, привычкой к нарушению правил охраны труда и, как следствие, пренебрежением ими. Наиболее высока вероятность гибели на производстве у работников со стажем работы по профессии до 5 лет (составляют около 54% случаев – усредненный показатель за наблюдаемый период), при этом около 30% погибших имеют стаж работы по профессии менее 1 года. Это в большинстве случаев связано с ошибочными и неправильными действиями, неопытностью и незнанием требований безопасности, пропуском необходимых операций.

Динамика распределения абсолютного числа травмированных на производстве по профессии в Республике Беларусь за период 2018–2023 гг. приведена в таблице 6^{10,11}.

Динамика распределения абсолютного числа травмированных на производстве по профессиям в Республике Беларусь за период 2018–2023 гг. показала, что в пятерку наиболее травмоопасных профессий входят водитель автомобиля, слесарь, тракторист, животновод, подсобный рабочий. Усредненный за период наблюдения процент травмированных водителей автомобилей составляет 9,5% от работников всех профессий (из них смертельно 16,2%). Это обусловлено высокой напряженностью труда, длительностью управления автомобильным транспортным средством в течение рабочей смены и необходимостью принятия оперативных решений в условиях постоянно изменяющейся дорожной обстановки. В течение часа работы водители автомобиля анализируют до 200 световых и звуковых сигналов с необходимостью быстрого реагирования на них.

¹⁰ Травматизм – 2023. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/4939-travmatizm-2023-itogi?ysclid=m9ucw7m6ax217454805> (дата обращения: 26.04.2025).

¹¹ Охрана труда и травматизм в Республике Беларусь 2024 года. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/5102-okhrana-truda-i-travmatizm-v-respublike-belarus-2024-goda-itogi?ysclid=m9yd40cp53688257600> (дата обращения: 26.04.2025).

Таблица 6. – Динамика абсолютного числа травмированных на производстве по профессии в Республике Беларусь за период 2018–2023 гг.^{12,13}

Профессия пострадавшего	Количество травм на производстве, чел.						из них со смертельным исходом, чел.					
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Водитель автомобиля	179	185	175	218	171	161	17	20	16	29	19	27
Слесарь	148	142	159	120	140	124	12	3	10	8	4	5
Тракторист	95	92	96	67	56	83	10	8	5	4	4	12
Животновод	79	86	78	97	97	91	4	10	13	6	6	5
Подсобный рабочий	73	83	88	74	74	104	7	9	8	3	2	6
Оператор машинного доения	48	67	46	51	52	48	–	–	–	1	–	1
Станочник деревообрабатывающих станков	44	56	53	50	32	35	–	–	–	1	1	–
Электромонтер	49	50	48	49	30	40	4	7	9	6	4	4
Плотник (бетонщик)	–	47	30	16	29	25	–	–	4	1	3	3
Уборщик	30	47	24	32	41	38	–	–	–	–	–	2
Электрогазосварщик	37	31	56	39	29	51	3	–	7	3	2	–
Каменщик	24	29	20	24	16	13	–	4	5	–	4	2
Повар	20	21	14	19	28	19	–	1	–	–	–	–
Сторож	25	21	26	12	12	17	3	3	3	3	1	–
Полевод	–	21	15	8	20	13	–	3	–	–	3	1
Дорожный рабочий	–	18	6	8	8	11	–	2	1	1	1	3
Кладовщик	–	17	9	27	6	10	–	2	–	–	–	–
Вальщик леса	25	20	22	26	16	15	3	2	3	5	–	2
Штукатур	–	15	15	14	10	15	–	–	–	–	–	1

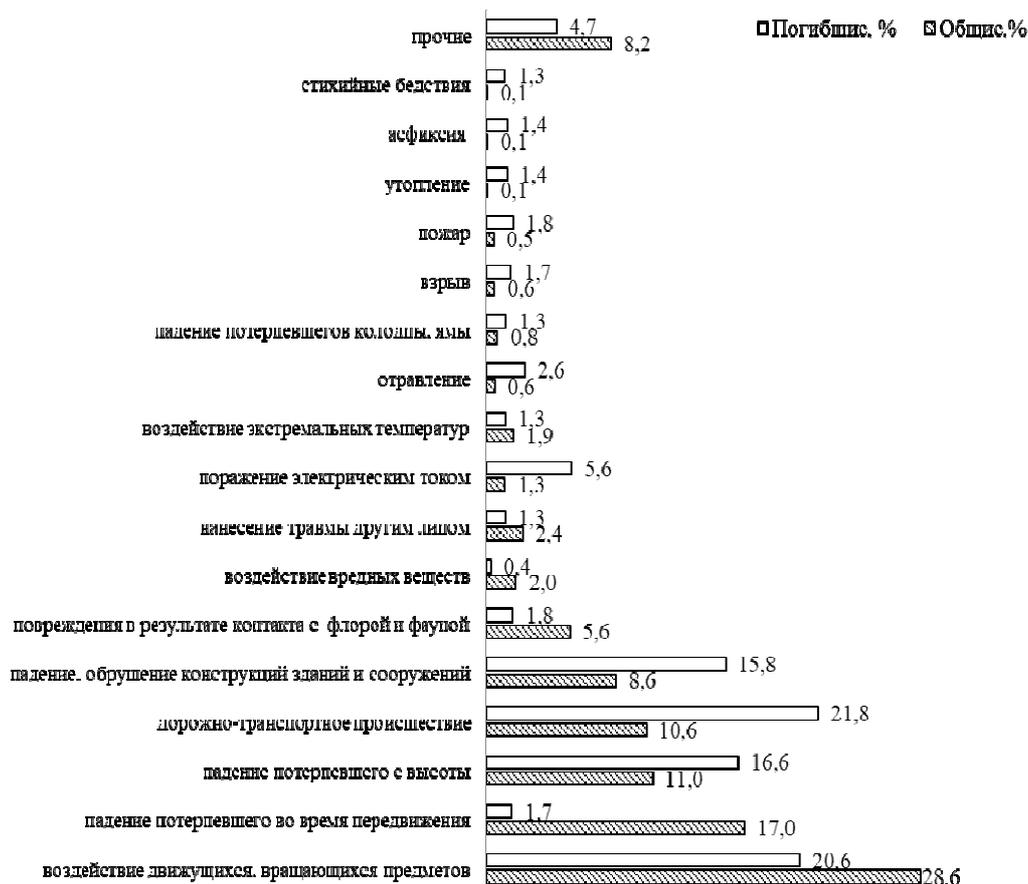


Рисунок 6. – Распределение процента травмированных на производстве по видам происшествий в Республике Беларусь

¹² Травматизм – 2023. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/4939-travmatizm-2023-itogi?ysclid=m9uscw7m6ax217454805> (дата обращения: 26.04.2025).

¹³ Охрана труда и травматизм в Республике Беларусь 2024 года. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/5102-okhrana-truda-i-travmatizm-v-respublike-belarus-2024-goda-itogi?ysclid=m9yd40cp53688257600> (дата обращения: 26.04.2025).

Распределение усредненного за период наблюдения процента травмированных на производстве по факторам травмирования (видам происшествий) в Республике Беларусь – см. рисунок 6^{14,15}.

Исходя из этого, наиболее высока вероятность получения травмы на производстве при воздействии движущихся, разлетающихся, вращающихся предметов, деталей; падений пострадавшего во время передвижения, а также с высоты; обрушений и падений конструкций зданий и сооружений, обвалов предметов, материалов, грунта; дорожно-транспортных происшествий.

Динамика распределения процента производственного травматизма по их основным причинам в Республике Беларусь за период 2018–2024 гг. приведена в таблице 7^{14,15}.

Таблица 7. – Динамика распределения процента производственного травматизма по их основным причинам в Республике Беларусь за период с 2018 по 2024 гг.^{14,15}

Основные причины производственного травматизма	Процент от их общего количества, % / со смертельным исходом, %						
	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
<i>Со стороны потерпевших:</i>							
нарушение трудовой дисциплины, требований нормативных, технических и локальных правовых актов по охране труда	22,7 11,5	24,9 15,5	25,4 17,5	26,7 17,5	25,3 17,2	25,6 15,9	25,6 17,7
личная неосторожность	13,4 0,9	14,0 1,0	15,6 0,9	17,2 2,3	18,3 0	20,1 2,9	18,3 0
нарушение требований безопасности при эксплуатации транспортных средств, машин, механизмов, оборудования, оснастки, инструмента	2,8 3,5	2,9 2,1	3,4 6,2	2,0 4,0	2,7 4,3	2,8 4,3	1,8 2,7
нахождение в состоянии алкогольного опьянения, в т.ч. не проведение предсменного медицинского осмотра на предмет нахождения в состоянии опьянения потерпевшего	1,3 4,4	2,0 4,7	1,8 6,2	1,5 3,4	2,2 4,8	1,2 2,2	1,9 5,5
нарушение правил дорожного движения потерпевшим	1,7 3,1	1,3 3,1	–	2,1 3,4	2,1 2,9	2,0 5,1	2,1 1,4
неприменение выданных средств индивидуальной защиты	1,4 1,8	2,3 1,6	1,4 0,9	1,3 1,7	1,6 1,4	1,6 1,4	1,5 0,7
<i>Со стороны должностных лиц нанимателя:</i>							
невыполнение руководителями и специалистами обязанностей по охране труда	13,7 17,6	11,0 16,1	11,3 12,3	9,7 14,7	9,6 12	10,0 14,5	8,7 13,6
неудовлетворительное содержание и недостатки в организации рабочих мест	3,0 6,2	2,8 4,7	2,9 5,7	3,4 5,6	3,1 5,3	3,6 5,1	4,0 5,4
допуск потерпевших к работе без обучения и проверки знаний по вопросам охраны труда	4,4 9,3	4,6 6,3	3,9 6,6	3,8 6,2	3,6 8,6	3,4 6,5	3,8 8,8
допуск потерпевших к работе без проведения стажировки по вопросам охраны труда и инструктажа по охране труда	4,2 7,9	3,8 5,2	3,5 5,7	3,9 6,2	3,3 6,2	3,4 7,2	3,4 7,5
необеспечение потерпевшего средствами индивидуальной защиты	1,4 3,5	1,4 2,1	–	–	1,4 3,3	1,1 3,6	1,2 3,4
отсутствие, некачественная разработка проектной документации на строительство, реконструкцию производственных объектов, сооружений, оборудования, нарушение требований проектной документации	1,1 2,2	1,5 2,6	–	0,8 2,3	1,6 4,3	1,4 2,1	1,0 4,1
эксплуатация неисправных машин, механизмов, оборудования, оснастки, инструмента, транспортных средств, конструктивные недостатки	2,3 1,3	1,8 2,2	–	1,7 2,8	1,4 1,9	1,1 2,2	0,3 –
привлечение потерпевших к работе не по специальности (профессии)	1,9 2,6	2,2 2,6	1,6 2,8	–	1,3 2,4	–	–
<i>Со стороны других работников:</i>							
нарушение требований по охране труда другими работниками, противоправные действия других лиц	7,7 5,2	7,1 9,9	4,3 7,1	5,0 10,2	4,6 6,2	1,5 2,9	6,4 4,1
нарушение правил дорожного движения другим лицом	4,6 5,3	4,6 4,7	3,3 1,9	4,0 3,4	3,7 5,7	3,5 4,3	4,6 2,7
Количество работающих, находившихся в момент травмирования в состоянии алкогольного опьянения:							
общее количество, чел.	93	93	85	63	81	55	–
из них со смертельным исходом, чел.	23	23	26	15	22	9	–

¹⁴ Травматизм – 2023. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/4939-travmatizm-2023-itogi?ysclid=m9ucw7m6ax217454805> (дата обращения: 26.04.2025).

¹⁵ Охрана труда и травматизм в Республике Беларусь 2024 года. Итоги [Электронный ресурс]. – URL: <https://otb.by/news/5102-okhrana-truda-i-travmatizm-v-respublike-belarus-2024-goda-itogi?ysclid=m9yd40cp53688257600> (дата обращения: 26.04.2025).

Таким образом, основные причины производственного травматизма связаны с действиями самих работников (человеческим фактором): нарушением трудовой дисциплины, требований нормативных, технических и локальных правовых актов по охране труда, личной неосторожностью (при этом отмечается рост по этим группам причин за наблюдаемый период), а также с невыполнением руководителями и специалистами обязанностей по охране труда.

Заключение. Сравнительный анализ динамики несчастных случаев на производстве с утратой трудоспособности на один рабочий день и более в Республике Беларусь и Российской Федерации за период 2001–2024 гг. с помощью методов корреляционного анализа позволил установить отрицательную линейную зависимость между коэффициентами частоты и тяжести травматизма, подтверждающую, что на фоне постоянного снижения производственного травматизма значительно возросла его тяжесть. Определены специфические особенности распределения показателей производственного травматизма в Республике Беларусь за период 2018–2024 гг. по территориальному признаку, гендерным различиям, профессии, возрасту и стажу работы, видам деятельности, факторам травмирования и их причинам. Выявленные факты и закономерности могут быть использованы специалистами по охране труда на предприятиях при разработке и планировании мероприятий по охране труда с целью снижения профессиональных рисков для работников и профилактики производственного травматизма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Производственный травматизм в Республике Беларусь // А.Н. Черевко, Л.Н. Ломать, С.В. Куницкая и др. / Вопросы организации и информатизации здравоохранения. – 2023. – № 3(116). – С. 24–32.
2. Бариева Е.Ф. Анализ производственного травматизма в Южном федеральном округе Российской Федерации и в Республике Беларусь // Экономика строительства и природопользования. – 2023. – № 4(89). – С. 86–96.
3. Булавка Ю.А., Самусевич В.Н. Использование цифровых инструментов интегрированных решений в области охраны труда // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2019. – № 11. – С. 72–81.
4. Булавка Ю.А. Анализ производственного травматизма на нефтеперерабатывающем предприятии // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2011. – № 3. – С. 130–137.
5. Кудрявцев А.Н., Босак В.Н. Анализ травматизма на производстве в Республике Беларусь // Вестн. БГСХА. – 2020. – № 3. – С. 188–193.
6. Невдах А.М. Производственный травматизм в Республике Беларусь // Актуальные вопросы механизации сельскохозяйственного производства: материалы респ. науч. конф. БГСХА / Горки (24–25 марта 2022 г.). – Горки: БГСХА, 2022. – С. 86–87.

REFERENCES

1. Cherevko, A.N., Lomat', L.N., Kunitskaya, S.V., Perkovskaya, A.F. & Girko, I.N. (2023). *Proizvodstvennyi travmatizm v Respublike Belarus'. Voprosy organizatsii i informatizatsii zdavoookhraneniya*, 3(116), 24–32. (In Russ.).
2. Barieva, E.F. (2023). *Analiz proizvodstvennogo travmatizma v Yuzhnom federal'nom okruge Rossiiskoi Federatsii i v Respublike Belarus' [Analysis of industrial injuries in the Southern Federal District of the Russian Federation and in the Republic of Belarus]. Ekonomika stroitel'stva i prirodopol'zovaniya [Construction Economic and Environmental Management]*, 4(89), 86–96. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Bulavka, Yu.A. & Samusevich, V.N. (2019). *Ispol'zovanie tsifrovyykh instrumentov integrirovannykh reshenii v oblasti okhrany truda [Use of Digital Tools for Integrated Solutions in the Sphere of Labor Protection]. Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, (11), 72–81. (In Russ., abstr. in Engl.).
4. Bulavka, Yu.A. (2011). *Analiz proizvodstvennogo travmatizma na neftepererabatyvayushchem predpriyatii [The Analysis of Industrial Injuries at the Oil Refinery]. Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, (3), 130–137. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Kudryavtsev, A.N. & Bosak, V.N. (2020). *Analiz travmatizma na proizvodstve v Respublike Belarus'. Vestnik BGSKhA*, (3), 188–193. (In Russ.).
6. Nevдах, A.M. (2022). *Proizvodstvennyi travmatizm v Respublike Belarus'. In: Aktual'nye voprosy mekhanizatsii sel'skokhozyaistvennogo proizvodstva: materialy respublikanskoj nauchnoy konferentsii BGSKhA (86–87). Gorki: BGSXA. (In Russ.).*

Поступила 26.04.2025

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF OCCUPATIONAL ACCIDENTS IN THE REPUBLIC OF BELARUS

V. IVANOV, Y. BULAUKA, A. SUNTSOV
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

A comparative analysis of the dynamics of industrial accidents with loss of working capacity for one working day or more in the Republic of Belarus and the Russian Federation was performed. Using correlation analysis methods, a negative linear relationship was confirmed between the coefficients of frequency and severity of injuries at enterprises for the period 2001–2024. Specific features of the distribution of indicators of industrial injuries in the Republic of Belarus for the period 2018–2024 were determined by territorial features, gender differences, profession, age and length of service, types of activity, injury factors and their causes.

Keywords: industrial accident, occupational injury, labor protection.

УДК 666.616; 552.11

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-81-87

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ НОВОДВОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИСКУССТВЕННЫХ ПОРИСТЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ

канд. техн. наук, доц. **С.Е. БАРАНЦЕВА**, канд. техн. наук, доц. **Ю.А. КЛИМОШ**,
канд. техн. наук, доц. **Р.Ю. ПОПОВ**, **А.И. ТАТУР**
(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Приведены результаты исследований комплексного использования полезных ископаемых Новодворского месторождения Республики Беларусь – глауконитсодержащих пород, базальтов и сапонитсодержащих туфов, для получения искусственных пористых заполнителей с требуемыми показателями физико-химических свойств. Данные экспериментальных исследований в комплексе с анализом специфики залегания пород, их минерального и химического состава позволили подтвердить возможность наиболее рационального использования полезных ископаемых и технологических отходов для сокращения их количества и минимизации площадей отвалов.

Ключевые слова: теплоизоляционный материал, глауконитсодержащая порода, базальт, сапонитсодержащий туф, химико-минеральный состав, термообработка, порообразование, структура.

Введение. Республика Беларусь обладает хорошим ресурсным потенциалом, который еще недостаточно широко используется, поэтому необходима постоянная работа по геологическому изучению недр и разработке месторождений полезных ископаемых.

В результате геологоразведочных работ в 2023 г. выполнена детальная разведка Новодворского месторождения базальтов и туфов – первого и единственного месторождения вышеуказанного сырья в Республике Беларусь, выявленного в 2016–2017 гг. в Пинском районе Брестской области [1–3]. При ее проведении использованы материалы предыдущих стадий изучения месторождения, в частности, поисково-оценочных работ 2016–2018 гг., предварительной разведки 2018–2020 гг., а также результаты научно-исследовательских работ Института природопользования НАН Республики Беларусь и кафедры технологии стекла, керамики и вяжущих материалов Белорусского государственного технологического университета.

По итогам проведенных исследований [4; 5] были разработаны составы керамических материалов различного назначения, в т.ч. искусственных пористых заполнителей с комплексом физико-химических свойств, рецептура сырьевых композиций которых обеспечивает показатели свойств, удовлетворяющие требованиям нормативно-технической документации.

Мотивация проведения исследований. Мотивацией для проведения настоящей научно-исследовательской работы является отсутствие в Республике Беларусь производства пористых заполнителей для легких бетонов из сырьевых композиций, в качестве основного компонента которых используются магматические и осадочные горные породы за исключением легкоплавкого глинистого сырья (производство керамзита).

Второй составной частью мотивации для проведения настоящей работы является расширение минерально-сырьевой базы республики за счет использования нетрадиционных для керамической отрасли полезных ископаемых перспективных к разработке месторождений (Новодворское месторождение базальтов и сапонитсодержащих туфов).

Третья составная часть мотивации – уменьшение экологической напряженности регионов, непосредственно прилегающих к горнодобывающим предприятиям, за счет утилизации некондиционных отсевов дробления пород и, соответственно, освобождения земель, занимаемых отходами, и превращения их в полезные сельскохозяйственные площади.

Цель исследования – корректировка качественного и количественного состава сырьевых композиций пористых материалов, обеспечивающего комплексное использование как полезных ископаемых (базальты, туфы), так и попутных (глауконитсодержащие пески, алевролиты и алевролиты); анализ рецептурно-технологических факторов, обеспечивающих формирование необходимой пористой структуры заполнителя и его физико-химических свойств.

Экспериментальная часть. Новодворское месторождение базальтов и туфов отличается специфическим залеганием пород, которые располагаются по высоте толщи сверху вниз в следующем порядке: вскрыша в виде строительных песков с примесью гравия → глауконитсодержащие пески, алевролиты и алевролиты → базальты → сапонитовые туфы. Учитывая разницу минерального (таблица 1) и химического (таблица 2) состава глауконитсодержащих пород, базальтов и сапонитсодержащих туфов [2; 3], представляло интерес комплексное использование пород в сырьевых композициях. Особенно важно использование базальтов в комбинации с глауконитсодержащей породой, а также с сапонитсодержащим туфом, в которых присутствует значительное количество глинистых составляющих.

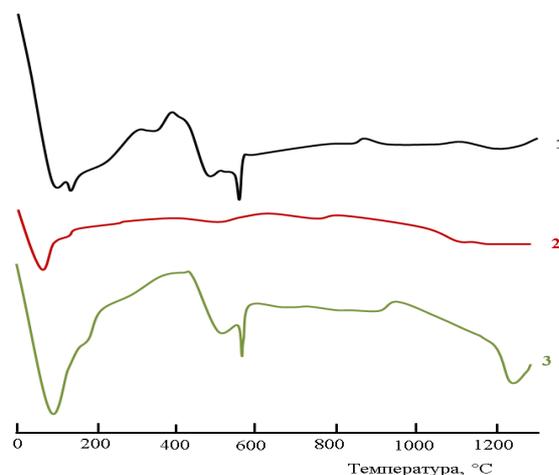
Таблица 1. – Средний минеральный состав используемых пород

Порода	Усредненный минеральный состав, мас. %
Глауконитсодержащая порода (алевриты, пески и алевролиты)	Кварц – 57; глауконит – 17; полевые шпаты (альбит, анортит, ортоклаз) – 11; каолинит – 7; мусковит – 3; сидерит – 3; фосфаты – 2
Базальт толеитовый	Плагиоклаз (андезин-лабрадор) – 30; моноклинный пироксен – 10; рудный (титаномагнетит, ильменит) – 9; цеолиты (клиноптилолит, морденит) – 5; вулканическое стекло, хлорофеит – 15, хлорит – 22,5; монтмориллонит – 17,5; гидрослюда – 5; гематит 3,5; кальцит 2,5; каолинит – 0,5
Туф сапонитсодержащий	Полевые шпаты (плагиоклаз, калиевые полевые шпаты) – 12,5; кварц – 10; биотит, мусковит – 0,5; моноклинный пироксен – 5; рудный (титаномагнетит, ильменит) – 3,5; цеолиты – 0,5; монтмориллонит (сапонит) – 20; гидрослюда 5; гематит – 5, доломит – 2,5; каолинит 2,5; хлорит 2,5; кальцит – 1,5

Таблица 2. – Средний химический состав исходных сырьевых компонентов

Компоненты	Содержание оксидов, мас. %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO+ Fe ₂ O ₃	K ₂ O+ Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	п.п.п.
Глауконитсодержащая порода	73,61	7,45	2,55	3,15	9,55	2,41	0,75	0,06	0,22	0,3
Базальт	46,11	11,49	5,0	7,87	14	4,3	1,74	0,31	–	9,18
Туф, скважина 9Д (10+11)	48,28	13,56	2,79	8,71	12,61	4,04	1,88	0,14	–	7,99
Глина «Лукомль»	55,2	14,1	5,6	–	34,42	7,62	–	–	–	9,0
Глина «Городное»	66,99	16,01	0,7	0,40	7,2	0,57	0,51	–	–	7,62

Сравнительная оценка кривых дифференциально-сканирующей калориметрии (рисунок 1) позволила конкретизировать физико-химические процессы и фазовые превращения при нагревании пород, а также температурные интервалы их плавления, необходимые для оптимизации температурных параметров режима обжига при получении пористых заполнителей.



1 – глауконитсодержащая валовая порода; 2 – базальт; 3 – туф сапонитсодержащий

Рисунок 1. – Кривые ДСК пород, используемых в сырьевых композициях пористых заполнителей

По результатам дифференциальной сканирующей калориметрии (см. рисунок 1, кривые 1, 3) можно отметить аналогию кривых ДСК глауконитсодержащей породы и сапонитсодержащего туфа, проявляющуюся в наличии эндотермических эффектов, соответствующих удалению свободной и физически связанной воды в интервале температур 80–145 °С; экзотермических эффектов, соответствующих окислению структурного железа (II) и переходу его в трехвалентное состояние при 305–410 °С. При температурах 490–540 °С происходит удаление конституционной воды из слоистой структуры глинистых (каолинит, мусковит) и гидрослюдистых минералов (глауконит, сапонит) и их последующее разложение. Эндозффект в интервале температур 572–578 °С объясняется полиморфным превращением кварца.

На кривой ДСК базальта (см. рисунок 1, кривая 2) также отмечается эндотермический эффект, соответствующий удалению свободной и физически связанной воды в интервале температур 80–145 °С; проявляется

тенденция эндоэффекта, соответствующего полиморфным превращениям кварца (572–578 °С). Отличительным признаком кривой ДСК базальта является отсутствие термоэффектов, соответствующих разложению глинистых минералов и карбонатов.

Температура плавления, согласно кривым ДСК и проведенной многопозиционной термической обработке, фиксируется при следующих температурах: для глауконитсодержащей породы – 1200 °С, базальта – 1195 °С, туфа – 1210 °С.

На первом этапе исследования изучалась возможность совместного использования базальтов и глауконитсодержащих пород. Качественный и количественный состав сырьевых композиций серии ГБ (таблица 4) характеризует вариации их содержания. В качестве пластификатора использовалась глина «Лукомль» в количестве 20 мас.% (сверх 100%). Порообразователем являлся карбид кремния, добавка которого составляла 0,5 мас. % (сверх 100%).

Таблица 4. – Качественный и количественный состав сырьевых композиций серии ГБ

Компоненты	Содержание компонентов, мас. %						
	ГБ-1	ГБ-2	ГБ-3	ГБ-4	ГБ-5	ГБ-6	ГБ-7
Глауконитсодержащая порода	20	30	40	50	60	70	80
Базальт	80	70	60	50	40	30	20
Глина (сверх 100%)	20	20	20	20	20	20	20
Карбид кремния (сверх 100%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Расчетный химический состав обожженных образцов серии ГБ приведен в таблице 5.

Таблица 5. – Расчетный химический состав образцов серии ГБ

Индекс состава	Массовое содержание оксидов, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO+ Fe ₂ O ₃	K ₂ O+ Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Σ
ГБ-1	54,31	11,62	4,86	6,23	16,71	4,62	1,39	0,23	0,04	100
ГБ-2	56,33	11,17	4,60	5,76	16,18	4,41	1,29	0,21	0,06	100
ГБ-3	58,32	10,72	4,35	5,30	15,66	4,21	1,19	0,19	0,08	100
ГБ-4	60,27	10,28	4,10	4,84	15,15	4,01	1,09	0,16	0,10	100
ГБ-5	62,20	9,85	3,85	4,39	14,64	3,81	1,00	0,14	0,12	100
ГБ-6	64,10	9,43	3,61	3,95	14,14	3,62	0,91	0,12	0,13	100
ГБ-7	66,05	8,91	3,40	3,55	13,61	3,42	0,82	0,10	0,14	100

При изготовлении образцов пористых заполнителей исходные сырьевые компоненты измельчались, подвергались сушке до постоянной массы в сушильном шкафу при температуре (105±5) °С. Приготовление массы осуществлялось поэтапно путем тщательного смешивания компонентов в сухом состоянии и последующем добавлении соответствующего количества воды.

Из массы формовались сырцовые гранулы, которые подсушивались в течение суток в естественных условиях и поступали на термическую обработку (вспучивание) по соответствующему режиму, включающему двухстадийную выдержку при определенных температурах, обеспечивающих переход системы в пиропластическое состояние и поризацию, после чего проводилось инерционное охлаждение. Состояние поверхности гранул пористого заполнителя и скола материала изучалось визуально.

Основными критериальными свойствами пористых заполнителей являются объемная и насыпная плотность, водопоглощение, коэффициент вспучивания, коэффициент теплопроводности и морозостойкость, которые определялись в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. На рисунке 2 приведены значения показателей вышеуказанных свойств образцов пористых заполнителей с вариативным содержанием базальта и глауконитсодержащей породы Новодворского месторождения.

Анализ показателей физико-химических свойств образцов серии ГБ, обожженных при температуре 1210 °С (см. рисунок 1), свидетельствует о том, что они несколько ухудшаются при увеличении в сырьевой композиции количества глауконитсодержащей породы. Так, коэффициент вспучивания уменьшается практически в два раза (рисунок 2, б), при этом объемная плотность также монотонно увеличивается, что наглядно прослеживается на рисунке 2, а, в. Существенного изменения водопоглощения не наблюдается, т.к. спекание образцов происходит практически однотипно (рисунок 2, з).

Таким образом, данные свидетельствуют о возможном комплексном использовании базальтовых и глауконитсодержащих пород Новодворского месторождения в различных вариациях, однако, количество глауконитсодержащей породы не должно превышать 50 мас.%. Это обеспечит наиболее рациональное использование полезных ископаемых месторождения и минимизацию площадей отвалов, предусматриваемых для отходов их добычи.

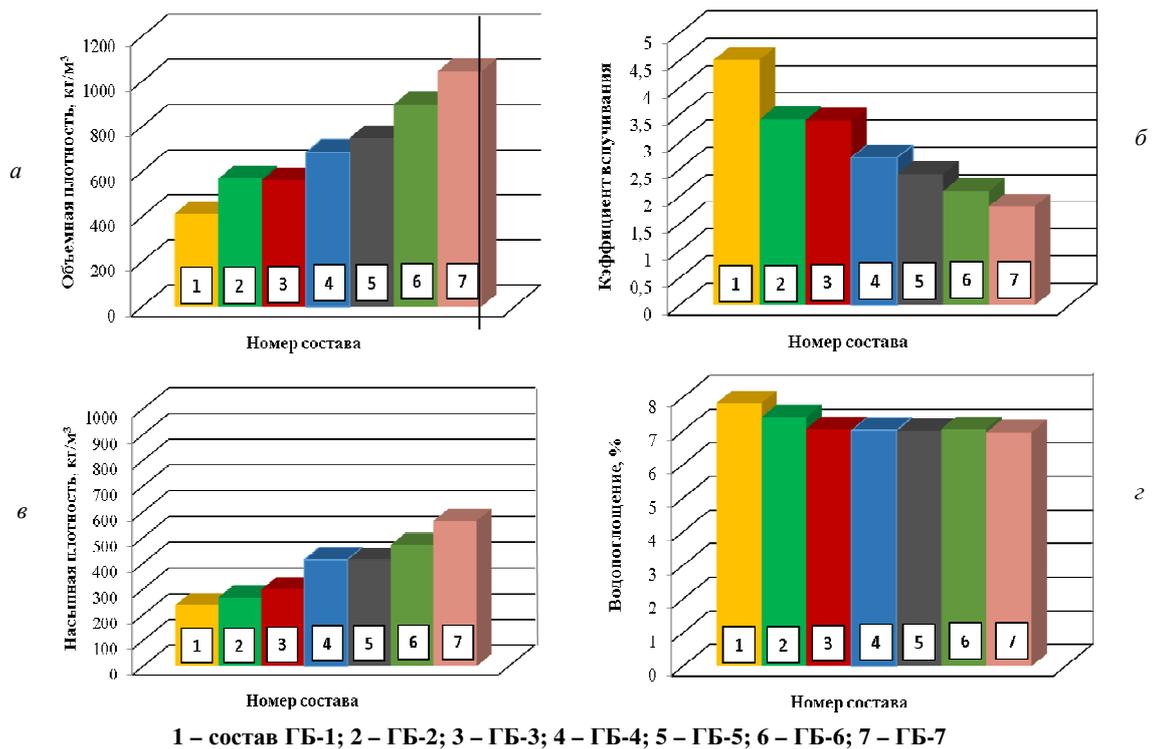


Рисунок 2. – Показатели объемной плотности (а), коэффициента впитывания (б), насыпной плотности (в) и водопоглощения (г) экспериментальных образцов теплоизоляционных пористых заполнителей

Фотографии образцов пористых заполнителей приведены на рисунке 3.

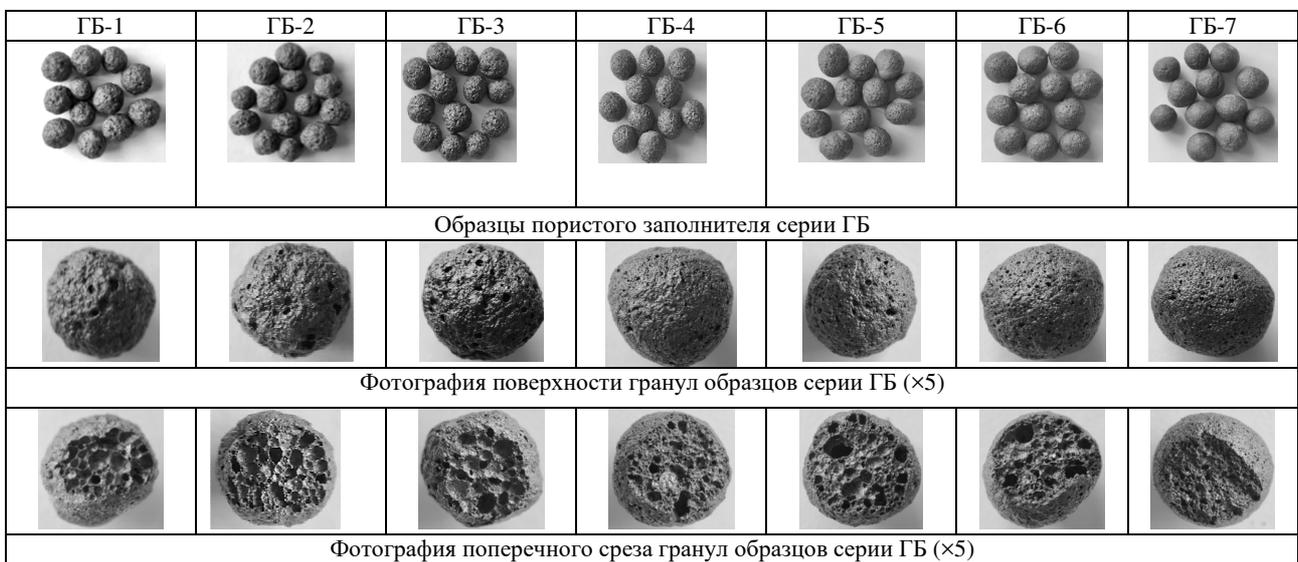


Рисунок 3. – Фотографии вспученных образцов пористых заполнителей серии ГБ, поверхности гранул и их поперечных срезов

Вторым этапом исследования стало изучение возможности комплексного использования базальта, глауконитсодержащей породы и сапонитсодержащего туфа в сырьевых композициях пористых заполнителей. В качестве пластифицирующего компонента применялась глина месторождения «Городное». Химический состав сырьевых материалов приведен в таблице 2. Качественный и количественный вариативный состав сырьевых композиций с комплексным введением трех пород Новодворского месторождения (базальта, глауконитсодержащей породы и сапонитсодержащего туфа) – в таблице 6 (серия ГБТ). Технологический процесс получения образцов пористых заполнителей серии ГБТ был аналогичен процессу получения образцов серии ГБ.

Таблица 6. – Состав сырьевых композиций пористых заполнителей с комплексным введением пород

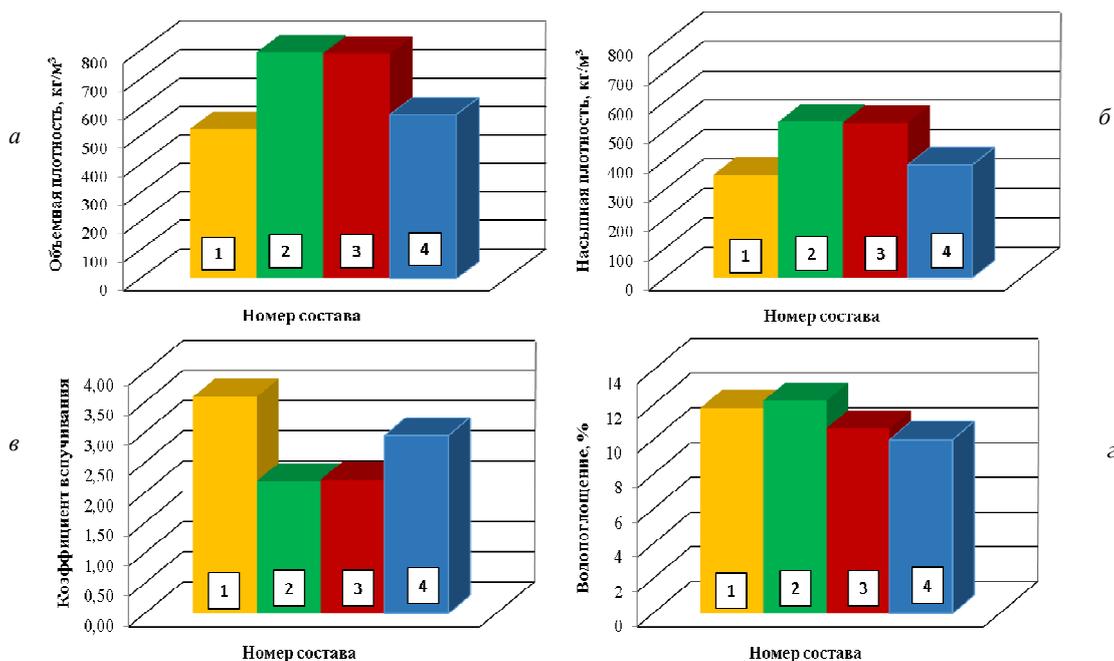
Компоненты	Содержание компонентов, мас. %			
	ГБТ-1	ГБТ-2	ГБТ-3	ГБТ-4
Глауконитовая порода	25	35	25	15
Базальт	25	15	35	25
Туф сапонитсодержащий	25	25	15	35
Глина «Городное»	25	25	25	25
Карбид кремния (сверх 100)	0,5	0,5	0,5	0,5

Расчетный химический состав обожженных образцов серии ГБТ приведен в таблице 7.

Таблица 7. – Расчетный химический состав образцов серии ГБТ

Индекс состава	Массовое содержание оксидов, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	FeO+ Fe ₂ O ₃	K ₂ O+ Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Σ
ГБТ-1	62,66	12,94	2,94	5,37	11,57	3,02	1,30	0,14	0,66	100
ГБТ-2	61,50	12,1	2,60	7,02	10,73	2,72	1,16	0,10	0,08	100
ГБТ-3	58,53	12,73	3,18	5,29	11,73	3,05	1,29	0,15	0,06	100
ГБТ-4	56,21	13,71	2,99	6,01	12,0	3,22	1,43	0,16	0,03	100

На рисунке 4 приведены значения показателей основных физико-химических свойств образцов пористых заполнителей с вариативным содержанием трех пород Новодворского месторождения (серия ГБТ).



1 – состав ГБТ-1; 2 – ГБТ-2; 3 – ГБТ-3; 4 – ГБТ-4

Рисунок 4. – Показатели объемной плотности (а), насыпной плотности (б), коэффициента вспучивания (в) и водопоглощения (з) экспериментальных образцов пористых заполнителей серии ГБТ

Анализ показателей физико-химических свойств образцов серии ГБТ, обожженных при температуре 1210 °С с выдержкой 5 мин (см. рисунок 4), свидетельствует о том, что все экспериментальные составы с вариативным содержанием составляющих компонентов (базальт, глауконитсодержащая порода, сапонитсодержащий туф и глинистый компонент) обеспечивают получение теплоизоляционных пористых заполнителей с показателями физико-химических свойств, удовлетворяющими требованиям стандартов к материалам аналогичного назначения.

Вместе с тем следует отметить, что увеличение количества глауконитсодержащей породы (см. рисунок 4, составы 2, 3) вызывает некоторое незначительное ухудшение показателей объемной и насыпной плотности, а также коэффициента вспучивания. Существенного изменения водопоглощения не наблюдается (см. рисунок 4, з), так как спекание образцов происходит практически однотипно и аналогично составам серии ГБ (см. рисунок 2, з).

Фотографии образцов пористых заполнителей серии ГБТ приведены на рисунке 5.

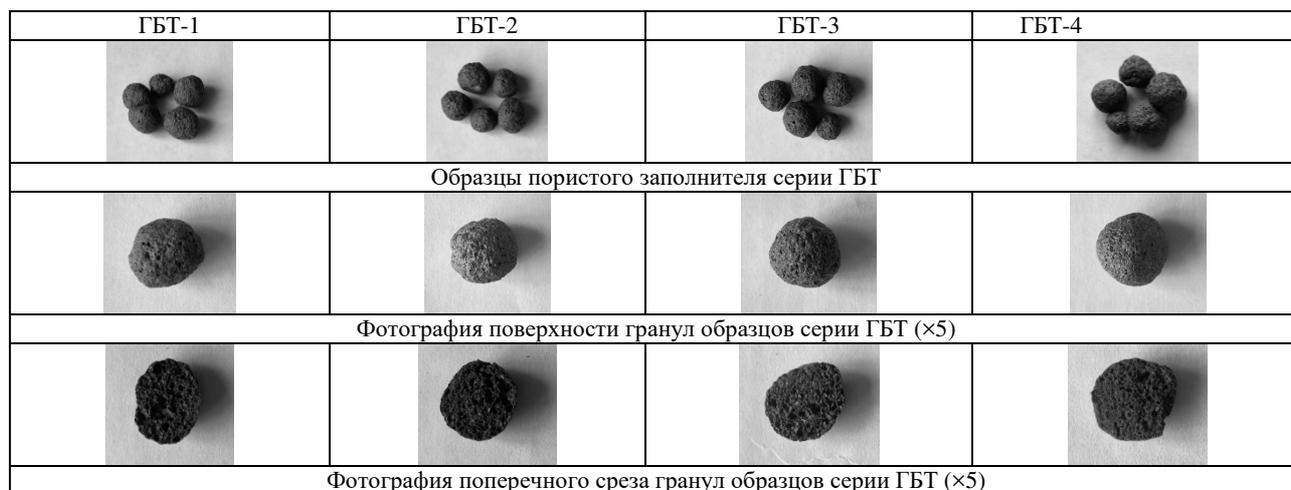


Рисунок 5. – Фотографии вспученных образцов пористых материалов серии ГБТ, поверхности гранул и их поперечных срезов

Вышеприведенные данные свидетельствуют о возможном комплексном использовании базальтовых, глауконитсодержащих пород и сапонитсодержащих туфов Новодворского месторождения в различных вариациях (см. таблицу 6), при этом составы ГБТ-1 и ГБТ-4 практически одинаковы по показателям технологических и физико-химических свойств.

Для оптимальных составов ГБ-4, ГБ-5 и ГБТ-1 дополнительно определены эксплуатационные свойства, показатели которых представлены в таблице 8. Согласно результатам, разработанные пористые заполнители соответствуют требованиям, предъявляемым к материалам аналогичного назначения.

Таблица 8. – Усредненные показатели свойств разработанных пористых заполнителей составов ГБ-4, ГБ-5 и ГБТ-1

Свойства	Показатели свойств
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	0,075–0,085
Прочность при сжатии, МПа	2,3–2,5
Высота падения сырьевых гранул без разрушения, см	90–100
Морозостойкость, циклов	130–160
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	90,0–93,0

Заключение. В результате проведенных исследований определены основные рецептурно-технологические факторы получения искусственных пористых заполнителей посредством комплексного и комбинированного использования полезных ископаемых Новодворского месторождения в экспериментально подтвержденных вариативных количествах. Разработанные материалы рекомендуются в качестве пористых заполнителей в производстве легких бетонов, блоков «термокомфорт», а также в качестве теплоизоляционной засыпки в индивидуальном строительстве.

При промышленной разработке Новодворского месторождения будет обеспечиваться наиболее рациональное и эффективное использование полезных ископаемых, их техногенных отходов – некондиционных отсеков дробления базальтов, отходов добычи глауконитсодержащих пород и туфов. Это внесет определенный вклад в расширение минерально-сырьевой базы республики, улучшение экологической ситуации прилегающих к горнопромышленному предприятию территорий и будет способствовать сокращению и минимизации площадей, занимаемых отвалами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вендские траппы Беларуси – перспективное сырье для силикатной промышленности / О.Ф. Кузьменкова, И.А. Левицкий, С.Е. Баранцева, Позняк А.И. и др. // Литасфера. – 2012. – № 2(37). – С. 130–137.
2. Базальты Пинской поисковой площади: геология и перспективы использования / О.Ф. Кузьменкова, В.П. Дашкевич, Г.Б. Качанко и др. // Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья: сб. докл. Междунар. науч. конф. / Минск (14–17 сент. 2016 г.). – Минск: Бел. наука, 2016. – Т. 1. – С. 544–550.
3. Глауконитсодержащие породы поискового участка Пинский (Беларусь) / О.Ф. Кузьменкова, Г.Д. Стрельцова, Т.М. Миненкова и др. // Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы: проблемы изучения и рационального использования: материалы Междунар. науч. конф., посвященной 215-летию со дня рождения И. Домейко / Минск (31 июля – 3 авг. 2017 г.). – Минск: СтройМедиаПроект, 2017. – С. 172–176.

4. Магматические и осадочные породы Республики Беларусь – сырьевая основа для получения теплоизоляционных пористых материалов / С.Е. Баранцева, А.И. Позняк, Ю.А. Климош и др. // Научно-технологические и инновационные (XXIV научные чтения): сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф. / Белгород (22–22 окт. 2021 г.). – Белгород: БГТУ, 2021. – С. 12–16.
5. Теплоизоляционный пористый материал на основе глауконитсодержащих песков и алевритов Новодворского месторождения Республики Беларусь / С.Е. Баранцева, А.И. Позняк, Ю.А. Климош и др. // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2021. – Т. 57, № 4. – С. 463–471. DOI: 10/29235/1561-8331-2021-4-463-471

REFERENCES

1. Kuz'menkova, O.F., Levitskii, I.A., Barantseva, S.E. & Poznyak, A.I. (2012). Vendские trappy Belarusi – perspektivnoe syr'e dlya silikatnoi promyshlennosti [Vendian traps of Belarus – promising raw material for silicate industry]. *Litasfera*, 2(37), 130–137. (In Russ., abstr. in Belarus., in Engl.).
2. Kuz'menkova, O.F., Dashkevich, V.P., Kachanko, G.B., Strel'tsova, G.D. & Mankevich, S.S. (2016). Bazal'ty Pinskoi poiskovoi ploshchadi: geologiya i perspektivy is-pol'zovaniya [Basalts of the Pinsk Search Area (Geology, Prospects)]. In: *Problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnikh resursov i ustoychivoe razvitie Poles'ya: sb. dokl. Mezhdunar. nauch. konf. / Minsk (14–17 sent. 2016 g.)*. V 2 t. T. 1 (544–550). Minsk: Belaruskaya navuka. (In Russ., abstr. in Belarus., in Engl.).
3. Kuz'menkova, O.F., Strel'tsova, G.D., Minenkova, T.M., Lappo, G.A., Kachanko, G.B., Laptsevich, A.G., ... & Mankevich, S.S. (2017). Glaukonitsoderzhashchie porody poiskovogo uchastka Pinskii (Belarus') [Glauconite Containing Rocks of Pinsk Search Area (Belarus)]. In: *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy zapada Vostochno-Evropeiskoi platformy: problemy izucheniya i ratsional'nogo ispol'zovaniya: materialy Mezhdunar. nauch. konf., posvyashchennoi 215-letiyu so dnya rozhdeniya I. Domeiko / Minsk (31 iyulya – 3 avg. 2017 g.)* (172–176). Minsk: StroiMediaProekt. (In Russ., abstr. in Belarus., in Engl.).
4. Barantseva, S.E., Poznyak, A.I., Klimosh, Yu.A. (2021). Magmatische i osadochnye porody Respubliki Belarus' – syr'evaya osnova dlya polucheniya teploizolyatsionnykh poristykh materialov. In: *Nauchno-tekhnologicheskie i innovatsionnye (XXIV nauchnye chteniya): sb. dokladov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. / Belgorod (22–22 okt. 2021 g.)*. (12–16). Belgorod: BGUTU. (In Russ.).
5. Barantseva, S.E., Poznyak, A.I., Klimosh, Yu.A., Azarenko, I.M., Gundilovich, N.N. & Pospelov, A.V. (2021). Teploizolyatsionnyy poristyj material na osnove glaukonitsoderzhashchih peskov i alevritov Novodvorskogo mestorozhdeniya Respubliki Belarus'[Heat-insulating porous material based on glauconite-containing sands and aleurites of the Novodvorskoye deposit of the Republic of Belarus]. *Vestnik Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Chemical Sciences]*, 57(4), 463–471 DOI: 10/29235/1561-8331-2021-4-463-471 (In Russ., abstr. in Belarus., in Engl.).

Поступила 30.06.2025

**COMPREHENSIVE USE OF MINERAL RESOURCES
OF THE NOVODVORSKY DEPOSIT
FOR THE PRODUCTION OF ARTIFICIAL POROUS AGGREGATES**

S. BARANTSEVA, Y. KLIMOSH, R. POPOV, A. TATUR
(Belarusian State Technological University, Minsk)

The results of studies of the integrated use of minerals from the Novodvorskoye deposit of the Republic of Belarus – glauconite-containing rocks, basalts and saponite-containing tuffs for the production of porous aggregates with the required physical and chemical properties are presented. Data from experimental studies, combined with an analysis of the specific occurrence of rocks, their mineral and chemical composition, made it possible to confirm the possibility of the most rational use of minerals and technological waste to reduce their quantity and minimize dump areas.

Key words: thermal insulation material, glauconite-containing rock, basalt, saponite-containing tuff, chemical and mineral composition, heat treatment, pore formation, structure.

УДК 665.7.038.5

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-88-92

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ РАБОТЫ АДГЕЗИИ К ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ РАСТВОРА СУЛЬФОНАТНОЙ ПРИСАДКИ В БАЗОВОМ МАСЛЕ HC-4 ПРИ ОБРАБОТКЕ УЛЬТРАЗВУКОМ В ПРИСУТСТВИИ СУКЦИНИМИДНЫХ ПРИСАДОК

Г. АННАЕВ

ORCID <https://orcid.org/0009-0002-9872-0788>

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>

А.Н. АВРАМЕНКО

ORCID <https://orcid.org/0009-0000-3457-6727>

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлены результаты исследования влияния обработки ультразвуком высокощелочной сульфонатной присадки на поверхностное натяжение и углы смачивания стальной пластинки раствором сульфонатной присадки в базовом гидрокрекинговом масле HC-4 в присутствии сукцинимидных присадок различной молекулярной массы. Выявлены закономерности изменения работы адгезии к стальной пластине раствора сульфонатной присадки в базовом масле при обработке ультразвуком без и в присутствии сукцинимидных присадок. Показано, что ультразвуковая обработка способствует модификации межфазных взаимодействий, а введение сукцинимидных присадок оказывает стабилизирующее влияние на свойства образующейся дисперсной системы. Полученные результаты позволяют оптимизировать состав пакетов присадок для повышения антикоррозионных свойств смазочных материалов и могут найти практическое применение при разработке новых пакетов присадок.

Ключевые слова: сульфонатные присадки, сукцинимидные присадки, базовое масло, поверхностное натяжение, работа адгезии, ультразвук, антикоррозионные свойства.

Введение. В современных условиях развития машиностроения и транспортной отрасли вопросы повышения долговечности и надежности металлических конструкций приобретают особую значимость. Одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационные характеристики и срок службы оборудования, является защита металлических поверхностей от коррозионного разрушения. Коррозия не только приводит к ухудшению механических свойств и преждевременному выходу из строя деталей, но и вызывает значительные экономические потери, связанные с ремонтом и заменой оборудования, а также риски для безопасности эксплуатации машин и механизмов.

Среди многочисленных подходов к обеспечению антикоррозионной защиты важное место занимают смазочные материалы с многофункциональными присадками, способными формировать на поверхности металла устойчивые защитные пленки. Особый интерес в этом контексте представляют сульфонатные присадки, обладающие выраженной способностью к пассивации металлов, высокой термической и химической стабильностью, а также способностью ингибировать процессы электрохимической коррозии. За последние десятилетия сульфонатные соединения получили широкое распространение в составе современных смазочных композиций [1–4]. В работе [5] проведена качественная и количественная оценка эффективности использования сульфонатных присадок в смеси с гидрокрекинговым базовым маслом HC-4 в качестве ингибирующих составов для защиты стали от коррозии.

Но несмотря на высокую эффективность, карбонатированные сульфонаты характеризуются определенной склонностью к агрегации и выпадению в осадок, особенно при длительном хранении и эксплуатации масел в условиях повышенных температур и механических нагрузок. Это приводит к снижению их антикоррозионных свойств и ухудшению других эксплуатационных характеристик смазочных материалов. Для повышения коллоидной стабильности и предотвращения агрегации в рецептуры смазочных композиций вводят диспергирующие и стабилизирующие компоненты, среди которых особое место занимают сукцинимидные присадки. Они способствуют равномерному распределению сульфонатных частиц в объеме масла и стабилизации защитных пленок на поверхности металла [6].

В последние годы все большее внимание уделяется использованию физических методов воздействия на присадочные системы, в частности, ультразвуковой обработке [7–10]. Ультразвук способен эффективно диспергировать компоненты, разрушать агломераты и способствовать формированию более однородных и прочных защитных слоев на металле. Однако влияние ультразвука на адгезионные характеристики сульфонатных присадок в присутствии сукцинимидных стабилизаторов до настоящего времени изучено недостаточно.

Работа адгезии раствора присадки к металлической поверхности рассматривается в качестве ключевого параметра, определяющего эффективность формирования защитного слоя и, как следствие, антикоррозионные свойства системы. Изучение закономерностей изменения работы адгезии при комплексном воздействии ультразвука и диспергирующих присадок позволит обосновать новые подходы к созданию более эффективных смазочных материалов для защиты стали от коррозии.

Целью настоящей работы является исследование влияния ультразвуковой обработки и присутствия сукцинимидных присадок различной молекулярной массы на работу адгезии растворов сульфонатных присадок в базовом масле HC-4 к поверхности стали.

Исследовательская часть. В качестве объектов исследования использованы:

- гидрокрекинговое базовое масло HC-4 с кинематической вязкостью при 100 °C 4,3 мм²/с, индексом вязкости 121 п., содержанием серы 10 мг/кг;
- карбонатированная сульфонатная присадка (СП) со щелочным числом 412 мг КОН/г;
- сукцинимидная присадка на основе изобутилена со средней молекулярной массой 1050 г/моль и щелочным числом 69 мг КОН/г;
- сукцинимидная присадка на основе изобутилена со средней молекулярной массой 2450 г/моль и щелочным числом 18 мг КОН/г.

Для изучения закономерности изменения работы адгезии были приготовлены образцы путем механического перемешивания компонентов при температуре 50–60 °C в течение 1 ч. Содержание сульфонатной присадки в растворе 5% масс. Содержание сукцинимидных присадок в растворе по 5% масс.

Обработка сульфонатной присадки ультразвуком проводилась при помощи ультразвукового диспергатора VCX-130 PB (Sonics Material (Cole-Parmer), США) при температуре не выше 60 °C.

Работа адгезии (W_a , Дж) растворов к поверхности стальной пластинки рассчитывалась по уравнению Дюпре–Юнга [11]: $W_a = \sigma(1 + \cos\theta)$, где σ – поверхностное натяжение на границе газ–жидкость, мН/м; θ – краевой угол смачивания.

Поверхностное натяжение определялось при помощи автоматического тензиометра Q2000 (Китай) при температуре 20 °C. Величина краевого угла смачивания образцами стальной пластинки измерялась при помощи цифрового микроскопа МИКМЕД 5.0 (Китай) с программным обеспечением для измерения углов с точностью до 0,01°. Для проведения исследований были использованы предварительно отшлифованные пластинки из стали со следующим элементным составом (в % масс.): железо – 98,3; марганец – 0,6; хром – 0,232; кремний – 0,197; никель – 0,153; углерод – 0,145; медь – 0,110; молибден – 0,061; примеси других элементов – 0,202. Элементный состав стальной пластинки был определен при помощи оптико-эмиссионного спектрометра SPECTROPORT (Германия).

Результаты изучения влияния удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на поверхностное натяжение ее раствора в базовом масле HC-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок представлены на рисунке 1.

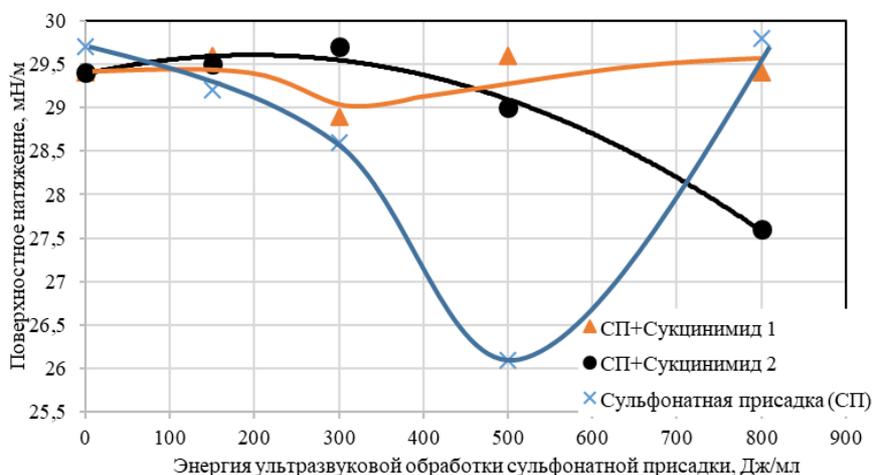


Рисунок 1. – Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на поверхностное натяжение ее раствора в базовом масле HC-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок

Установлено, что увеличение удельной энергии ультразвуковой обработки приводит к снижению поверхностного натяжения раствора сульфонатной присадки. Это указывает на повышение поверхностной активности системы. Введение сукцинимидных присадок способствует стабилизации поверхностного натяжения и снижает чувствительность раствора к ультразвуковому воздействию. Наиболее выраженный стабилизирующий эффект отмечается у сукцинимидной присадки с меньшей молекулярной массой.

Результаты изучения влияния удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на угол смачивания стальной пластинки ее раствором в базовом масле HC-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок представлены на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, при увеличении удельной энергии ультразвуковой обработки угол смачивания для раствора сульфонатной присадки сначала уменьшается, достигая минимума, а затем возрастает. Это свиде-

тельствует о повышении смачиваемости поверхности стали при оптимальных режимах ультразвукового воздействия. Введение сукцинимидных присадок приводит к увеличению угла смачивания и сглаживает экстремальный характер зависимости, особенно для присадки с меньшей молекулярной массой, что указывает на стабилизирующее влияние данных добавок на свойства системы.

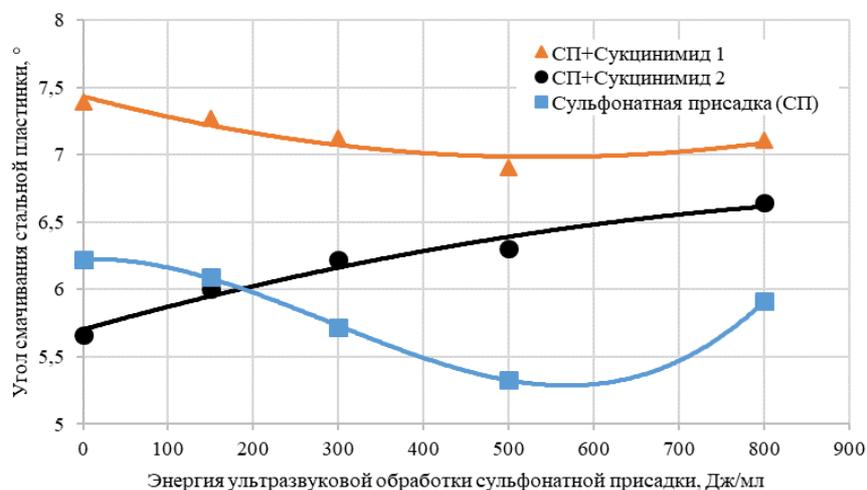


Рисунок 2. – Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на угол смачивания стальной пластинки ее раствором в базовом масле Н-С4 без и в присутствии сукцинимидных присадок

Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на работу адгезии, рассчитанной по уравнению Дюпре–Юнга, к стальной пластинке ее раствора в базовом гидрокрекинговом масле НС-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок представлено на рисунке 3.

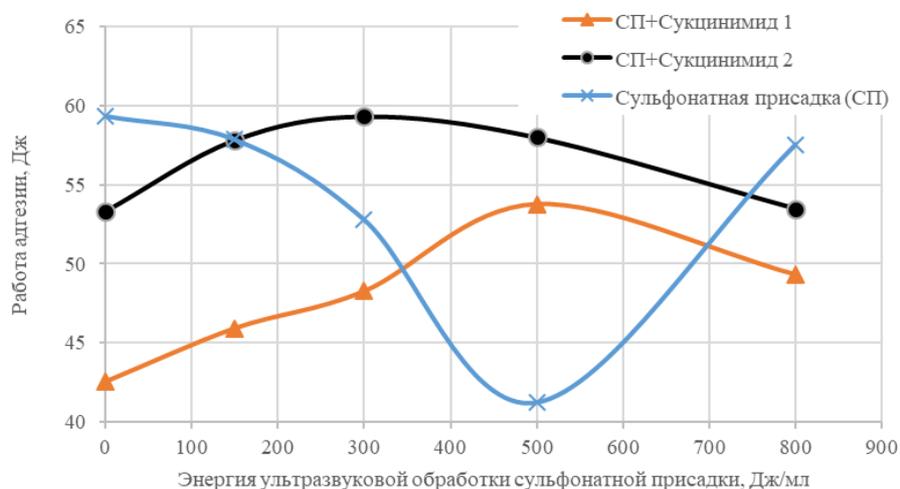


Рисунок 3. – Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на работу адгезии к стальной пластинке ее раствора в базовом масле НС-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок

Отмечено, что для раствора сульфонатной присадки в базовом масле без добавок сукцинимидов наблюдается выраженный экстремальный характер зависимости работы адгезии от энергии ультразвуковой обработки. Так, при увеличении энергии до 500 Дж/мл работа адгезии снижается, после чего вновь возрастает. Введение сукцинимидных присадок приводит к сглаживанию данной зависимости. Особенно заметен стабилизирующий эффект для сукцинимида с большей молекулярной массой (Сукцинимид 2), где работа адгезии изменяется незначительно во всем диапазоне энергий. Таким образом, сукцинимидные присадки способствуют стабилизации адгезионных свойств системы и уменьшают влияние ультразвуковой обработки на работу адгезии.

В процессе растворения присадок в базовом масле протекают процессы коагуляции и диспергирования входящих в них компонентов, в конечном итоге приводящие к формированию мицелл определенного состава и строения. При обработке сульфонатной присадки ультразвуком происходит диспергирование содержащихся в ее составе ватеритов с размером частиц от 33 до 36 нм [12], что приводит к изменению их коллоидного состо-

ания. При диспергировании количество мицелл увеличивается, а при коагуляции уменьшается. При этом увеличивается их размер.

Оценка влияния обработки ультразвуком сульфонатной присадки и введения в раствор сукцинимидных присадок на коллоидное состояние исследуемых образцов проводилась путем сравнения изменения ими коэффициента пропускания света с длиной волны 500 нм. Длина волны проходящего света выбрана на основании экспериментальных данных. Исследования проводились при помощи спектрофотометра ЭКРОСХИМ ПЭ-5400УФ (Россия). Зависимость изменения коэффициента пропускания света исследуемыми образцами от удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки перед ее введением в раствор представлена на рисунке 4.

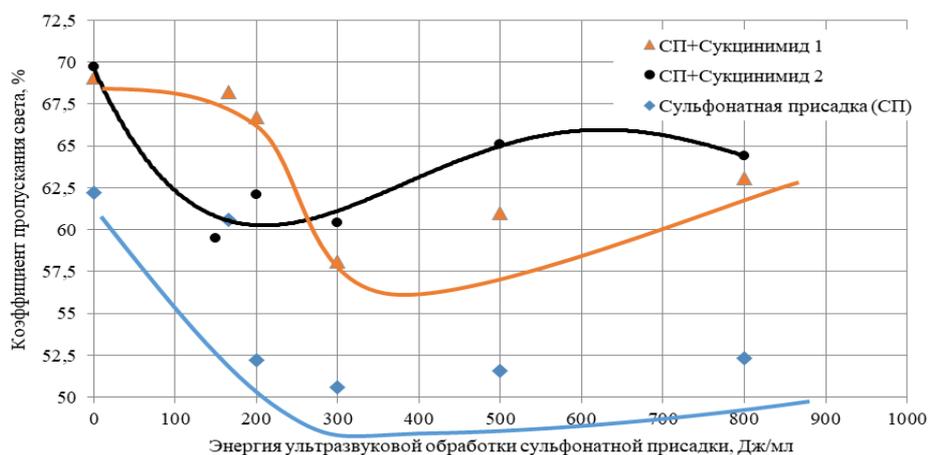


Рисунок 4. – Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на коэффициент пропускания света ее раствором в базовом масле НС-4 без и в присутствии сукцинимидных присадок

Установлено, что при увеличении энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки для раствора без добавок сукцинимидов наблюдается выраженное снижение коэффициента пропускания света. Это свидетельствует о росте степени дисперсности системы и образовании мелкодисперсных частиц. Введение сукцинимидных присадок приводит к заметному увеличению коэффициента пропускания света по сравнению с чистой сульфонатной присадкой и сглаживает экстремальный характер зависимости, особенно для присадки с большей молекулярной массой. Это указывает на стабилизирующее действие сукцинимидных присадок и повышение коллоидной стабильности раствора.

Таким образом, ультразвуковая обработка сульфонатной присадки перед ее введением в базовое масло НС-4 приводит к снижению краевого угла смачивания поверхности стали и увеличению работы адгезии. Введение сукцинимидных присадок различной молекулярной массы оказывает стабилизирующее воздействие на систему, предотвращая агрегацию частиц дисперсной фазы, содержащихся в сульфонатной присадке.

Максимальное повышение работы адгезии наблюдается при совместном применении ультразвуковой обработки и сукцинимидных присадок с меньшей молекулярной массой, что связано с эффективной диспергацией и формированием стабильного защитного слоя.

Заключение. Проведенные эксперименты показали, что ультразвуковая обработка в сочетании с введением сукцинимидных присадок существенно повышает работу адгезии сульфонатных присадок в базовом масле НС-4 к поверхности стали. Наиболее выраженный эффект достигается при использовании сукцинимидных присадок с меньшей молекулярной массой. Полученные результаты могут быть применены для оптимизации состава пакетов присадок с целью повышения антикоррозионных свойств смазочных материалов и найти практическое применение при разработке новых пакетов присадок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шехтер Ю.Н., Крейн С.Э., Калашников В.П. Маслорастворимые сульфаты (производство и применение). – М.: Гостехиздат, 1963. – 127 с.
2. Шехтер Ю.Н. Защита металлов от коррозии (ингибиторы, масла и смазки). – М., Л.: Химия, 1964. – 120 с.
3. Богданова Т.И., Шехтер Ю.Н. Ингибированные нефтяные составы для защиты от коррозии. – М.: Химия, 1984. – 248 с.
4. Специальные технологии переработки природных энергоносителей: Производство присадок и пакетов присадок к маслам: учеб.-метод. комплекс / С.В. Покровская, И.В. Бурая, Ю.А. Булавка и др. – Новополюцк: Полоц. гос. ун-т, 2013. – 94 с.
5. Антикоррозионные свойства сульфонатных присадок / Г. Аннаев, А.А. Ермак, Н.А. Советников и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 1(49). – С. 107–111. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-107-111

6. Кулиев А.М. Химия и технология присадок к маслам и топливам. – Л.: Химия, 1985. – 312 с.
7. Клокова Т.П., Володин Ю.А., Глаголева О.Ф. Влияние ультразвука на коллоидно-дисперсные свойства нефтяных систем // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – № 1. – С. 32–34.
8. Кузнецов О.Л., Ефимова С.Ф. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
9. Туманян Б.П. Ультразвук на промысле и не только // Нефть России. – 1997. – № 7. – С. 45–46.
10. Иванов М.Г., Иванов Д.М., Бурая И.В. Закономерности изменения антикоррозийной активности сульфонатных присадок в полиальфоолефиновом масле под действием ультразвука // Бултеровские сообщения. – 2022. – Т. 72, № 11. – С. 106–113. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-72-11-106
11. Люпис К. Химическая термодинамика материалов: [пер. с англ.] / под ред. Н.А. Ватолина, А.Я. Стомахина. – М.: Металлургия, 1989. – 503 с.
12. Calcium carbonate phase transformations during the carbonation reaction of calcium heavy alkylbenzene sulfonate overbased nanodetergents preparation / Zhaocong Chen, Shan Xiao, Feng Chen et al. // Journal of Colloid and Interface Science. – 2011. – Vol. 359, Iss. 1. – P. 56–67. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.03.086

REFERENCES

1. Shekhter, Yu.N., Kreyn, S.E. & Kalashnikov, V.P. (1963). *Maslorastvorimye sulfonaty (proizvodstvo i primeneniye)*. Moscow: Gostoptekhizdat. (In Russ.).
2. Shekhter, Yu.N. (1964). *Zashchita metallov ot korrozii (ingibitory, masla i smazki)*. Moscow, Leningrad: Khimiya. (In Russ.).
3. Bogdanova, T.I. & Shekhter, Yu.N. (1984). *Ingibirovannyye neftyanye sostavy dlya zashchity ot korrozii*. Moscow: Khimiya. (In Russ.).
4. Pokrovskaya, S.V., Buraya, I.V., Bulavka, Yu.A., Babushkin, M.O. & Zavadskii, A.V. (2013). *Spetsial'nye tekhnologii pererabotki prirodnykh energonositelei: Proizvodstvo prisadok i paketov prisadok k maslam*. Novopolotsk: Polotsk state University. (In Russ.).
5. Annaev, G., Ermak, A.A., Sovetnikov, N.A. & Mammedov, B.M. (2024). Antikorrozionnye svoystva sul'fonatnykh prisadok [Anticorrosive Properties of Sulfonate Additives]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnyye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 1(49), 107–111. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-107-111 (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Kuliev, A.M. (2024). *Khimiya i tekhnologiya prisadok k maslam i toplivam*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.).
7. Klokova, T.P., Volodin, Yu.A. & Glagoleva, O.F. (2006). Vliyanie ul'trazvuka na kolloidno-dispersnyye svoystva neftyanykh sistem. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel*, (1), 32–34. (In Russ.).
8. Kuznetsov, O.L. & Efimova, S.F. (1983). *Primeneniye ul'trazvuka v neftyanoy promyshlennosti*. Moscow: Nedra. (In Russ.).
9. Tumanyan, B.P. (1997). Ul'trazvuk na promysle i ne tol'ko. *Neft' Rossii*, (7), 45–46. (In Russ.).
10. Ivanov, M.G., Ivanov, D.M. & Buraya, I.V. (2022). Zakonomernosti izmeneniya antikorroziynoy aktivnosti sul'fonatnykh prisadok v polial'foolefinovom masle pod deystviem ul'trazvuka [Patterns of changes in the anticorrosion activity of sulfonate additives in polyalphaolefin oil under the action of ultrasound]. *Butlerovskie soobshcheniya [Butlerov Communications]*, 72(11), 106–113. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/22-72-11-106 (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Lyupis, K. (1989). *Khimicheskaya termodinamika materialov: [per. s angl.]*. In N.A. Vatolina & A.Ya. Stomakhina (Eds). Moscow: Metallurgiya. (In Russ.).
12. Zhaocong, Chen, Shan, Xiao, Feng, Chen, Dongzhong, Chen, Jianglin, Fang & Min, Zhao. (2011). Calcium carbonate phase transformations during the carbonation reaction of calcium heavy alkylbenzene sulfonate overbased nanodetergents preparation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 359(1), 56–67. DOI: 10.1016/j.jcis.2011.03.086

Поступила 30.06.2025

REGULARITIES OF CHANGING THE WORK OF ADHESION TO THE SURFACE OF A SOLUTION OF SULFONATE ADDITIVE IN BASE OIL NS-4 DURING ULTRASONIC TREATMENT IN THE PRESENCE OF SUCCINIMIDE ADDITIVES

G. ANNAYEV, A. YERMAK, A. AVRAMENOK
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article presents the results of a study of the effect of ultrasonic treatment of a highly alkaline sulfonate additive on the surface tension and wetting angles of a steel plate with a solution of the sulfonate additive in the base hydrocracking oil NS-4 in the presence of succinimide additives of different molecular weights. The regularities of changes in the work of adhesion to a steel plate of a solution of the sulfonate additive in the base oil during ultrasonic treatment without and in the presence of succinimide additives are revealed. It is shown that ultrasonic treatment contributes to the modification of interphase interactions, and the introduction of succinimide additives has a stabilizing effect on the properties of the resulting dispersed system. The obtained results allow optimizing the composition of additive packages to improve the anticorrosive properties of lubricants and can find practical application in the development of new additive packages.

Keywords: *sulfonate additives, succinimide additives, base oil, surface tension, adhesion work, ultrasound, anticorrosive properties.*

УДК 665.7.038.5

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-93-97

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ УЛЬТРАЗВУКОМ СУЛЬФОНАТНЫХ И ФЕНАТНЫХ ПРИСАДОК НА АНТИКОРРОЗИОННУЮ АКТИВНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ К ОБРАЗОВАНИЮ ОСАДКА ПАКЕТА ПРИСАДОК К СМАЗОЧНЫМ МАСЛАМ

Г. АННАЕВ

ORCID <https://orcid.org/0009-0002-9872-0788>

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Рассмотрено влияние ультразвуковой обработки сульфонатных и фенатных присадок на антикоррозионную активность и устойчивость к образованию осадка пакетов присадок к смазочным маслам. Исследованы образцы пакетов с различным составом и технологией смешивания, включая обработку высокощелочного сульфоната кальция и фената кальция ультразвуковыми колебаниями частотой 20–30 кГц. Установлено, что применение ультразвука с удельной энергией до 500 Дж/см³ позволяет увеличить антикоррозионную активность пакета присадок в 2,8 раза без негативного влияния на склонность к осадкообразованию и окислительную стабильность. Изменение электродного потенциала металлов подтверждает улучшение защитных свойств обработанных пакетов. Результаты открывают перспективы для повышения эффективности присадочных систем в смазочных материалах двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, сульфонатные присадки, фенатные присадки, пакеты присадок, антикоррозионная активность, осадкообразование, смазочные масла, электродный потенциал.

Введение. Современные пакеты присадок к смазочным маслам представляют собой многокомпонентные системы, включающие базовые масла (минеральные или синтетические), моюще-диспергирующие агенты, антиоксиданты, противоизносные и антикоррозионные добавки, модификаторы трения и депрессорные присадки. Каждый компонент выполняет специфическую функцию: моющие присадки предотвращают образование лаковых отложений, антиоксиданты замедляют окисление масла, а противоизносные агенты снижают механический износ трущихся поверхностей. Критическим фактором, определяющим стабильность и эффективность пакета, является не только состав, но и технология его приготовления, включая последовательность смешивания компонентов и методы их предварительной модификации [1].

Антикоррозионные свойства пакетов присадок преимущественно обеспечиваются сульфонатами кальция, которые формируют на поверхности металла защитные слои за счет физической адсорбции, образования коллоидных пленок и химического взаимодействия с субстратом. Исследования демонстрируют, что нейтральные сульфонаты (щелочное число 10–30 мг КОН/г) проявляют более высокую ингибирующую активность по сравнению со сверхосновными аналогами (щелочное число 300–400 мг КОН/г), что связано с их способностью образовывать плотные адсорбционные слои без избыточного выделения карбонатных частиц. Однако введение нейтральных сульфонатов в состав пакетов не решает проблему седиментации, обусловленную присутствием в высокощелочных присадках (фенатах и сульфонатах кальция) ассоциатов карбоната кальция (CaCO₃) размером 5–50 нм. Увеличение дисперсности этих частиц до 1–5 нм за счет ультразвуковой обработки может стать ключевым решением для повышения стабильности пакетов¹ [2–4].

Одной из основных причин осадкообразования в пакетах присадок является коагуляция карбонатных наночастиц, возникающих в процессе карбонатирования высокощелочных компонентов. Фазовые превращения CaCO₃ (аморфная → ватерит → арагонит → кальцит) сопровождаются ростом кристаллов до микрометрового диапазона, что резко повышает склонность к седиментации. Традиционные методы стабилизации, такие как введение диспергаторов или оптимизация pH среды, часто приводят к снижению антикоррозионной активности из-за конкурентной адсорбции добавок на поверхности металла. Альтернативным подходом является применение ультразвуковой обработки, которая индуцирует кавитацию, разрушающую крупные ассоциаты и обеспечивающую монодисперсное распределение частиц. Экспериментально доказано, что снижение размера карбонатных частиц с 200 нм до 20 нм увеличивает активную поверхность сульфонатов на 40%, что потенциально усиливает их защитные свойства.

Цель работы – исследовать влияние ультразвуковой обработки высокощелочных сульфонатных и фенатных присадок на антикоррозионную активность и устойчивость к образованию осадка пакета присадок к смазочным маслам, а также оценить перспективы повышения их эффективности.

Основная часть. В качестве объектов исследования использованы следующие образцы пакетов присадок:

– образец № 1. Пакет присадок, полученный путем последовательного смешивания при 70 °С в течение 1 ч с маслом-разбавителем SN-150 высокощелочного фената кальция, полиалкенилсукцинимида и диалкил-

¹ EP 0875502 B1. Смазочная композиция. Опубл. 04.11.1998.

дитиофосфата цинка – первая порция. Последовательного смешивания при 70 °С в течение 1 ч с маслом-разбавителем SN-150 высокощелочного сульфоната кальция и беззольного фенольного антиоксиданта – вторая порция. Смешивания первой и второй порции при 70 °С в течение 1 ч;

– образец № 2. Пакет присадок, полученный путем последовательного смешивания при 70 °С в течение 1 ч с маслом-разбавителем SN-150 высокощелочного фената кальция, полиалкенилсукцинимид, диалкилдитиофосфата цинка, беззольного фенольного антиоксиданта и высокощелочного сульфоната кальция;

– образец № 3. Пакет присадок, полученный путем последовательного смешивания при 70 °С в течение 1 ч с маслом-разбавителем SN-150 высокощелочного фената кальция, полиалкенилсукцинимид, диалкилдитиофосфата цинка, беззольного фенольного антиоксиданта, высокощелочного сульфоната кальция и нейтрального сульфоната кальция.

При получении образцов были использованы одинаковые присадки с идентичным массовым содержанием в пакете присадок. В состав образца № 3 дополнительно введен нейтральный сульфат кальция при массовом отношении высокощелочного и нейтрального сульфата кальция 2,5 к 1.

Антикоррозионная активность образцов оценивалась по ГОСТ 9.054-75 (метод 4) с определением показателя коррозии K в $г/м^2$. Устойчивость пакетов к осадкообразованию исследовалась согласно требованиям ГОСТ 33114-2021. Изменение электродного потенциала металлов в коррозионной среде контролировалось по методике, описанной в [5]. Индукционный период окисления пакетов присадок определялся по ASTM D6186 при температуре 210 °С и давлении кислорода 3,5 МПа.

Результаты оценки антикоррозионной активности и устойчивости к образованию осадка представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Изменение антикоррозионной активности пакетов присадок

Образец	Показатель коррозии, $г/м^2$
№ 1	4,7
№ 2	4,0
№ 3	3,4

Наилучшая антикоррозионная активность по показателю коррозии K отмечена у образца № 3, в который нейтральный сульфат кальция вводился последним.

Для подтверждения эффективности применения ультразвуковой обработки были приготовлены пакеты присадок, аналогичные образцу № 3, в которых ультразвуковой обработке были подвергнуты высокощелочной сульфат кальция и/или высокощелочной фенат кальция. Предложенный способ характеризуется примерами.

Пакет присадок, аналогичный образцу № 3, был дополнительно подвергнут обработке высокощелочного сульфата кальция ультразвуковыми колебаниями с частотой 20–30 кГц. Для этого применялся ультразвуковой дезинтегратор типа VCSX-130 РВ или другой аппарат, обеспечивающий необходимый диапазон частот. Обработка проводилась непосредственно перед введением сульфата в состав пакета присадок.

Влияние величины удельной энергии ультразвуковых колебаний, переданной высокощелочному сульфату кальция, на антикоррозионную активность пакета присадок оценивалось по показателю коррозии K ($г/м^2$) согласно ГОСТ 9.054-75 (метод 4). Полученные данные представлены на рисунке 1.

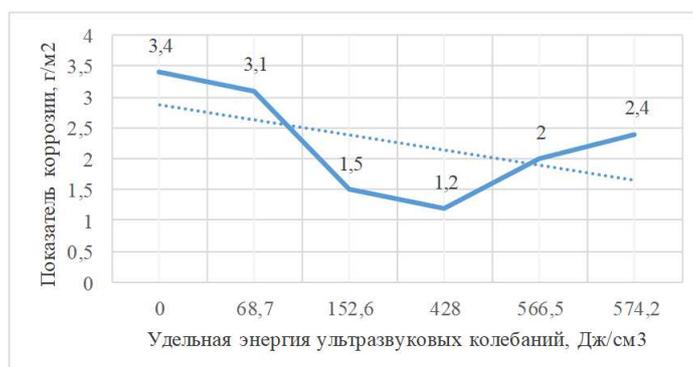


Рисунок 1. – Влияние величины удельной энергии ультразвуковых колебаний, переданной высокощелочному сульфату на антикоррозионную активность пакета присадок

Как видно из рисунка 1 ($y = -0,2457x + 3,1267$, $R^2 = 0,2785$), при увеличении удельной энергии ультразвуковой обработки высокощелочного сульфата кальция защитные свойства пакета присадок повышаются, достигая максимума при величине энергии около 500 Дж/см³. При дальнейшем увеличении удельной энергии

наблюдается снижение антикоррозионной активности, что может быть связано с изменением структуры присадки и деградацией активных компонентов.

Пакет присадок, аналогичный образцу № 3, дополнительно подвергался ультразвуковой обработке не только высокощелочного сульфоната кальция, но и высокощелочного фената кальция при частоте колебаний 20–30 кГц. Влияние удельной энергии ультразвуковых колебаний, переданных обоим компонентам, на антикоррозионную активность пакета присадок представлено в таблице 2.

Таблица 2. – Влияние величины удельной энергии ультразвуковых колебаний переданных высокощелочному сульфонату кальция и фенату кальция на антикоррозионную активность пакета присадок

Удельная энергия ультразвуковых колебаний переданных сульфонату кальция / фенату кальция, Дж/см ³	0	95,0/ 68,7	238,7/ 152,6	357,2/ 428,0	601,5/ 687,7	816,7/ 897,0
Показатель коррозии, г/м ²	3,4	2,9	2,6	1,4	2,0	2,7

Применение ультразвуковых колебаний с частотой 20–30 кГц и удельной энергией не более 500 Дж/см³ к высокощелочному сульфонату кальция и/или высокощелочному фенату кальция с последующим введением обработанных компонентов в минеральное базовое масло при непрерывном механическом перемешивании вместе с необработанными компонентами позволяет увеличить антикоррозионную активность пакета присадок к смазочным маслам в 2,8 раза. При этом ультразвуковая обработка не оказывает существенного влияния на склонность пакета к образованию осадка и не снижает его окислительную стабильность.

Изменение электродного потенциала металлов в коррозионной среде оценивалось по методике [5]. Элементный состав использованных в работе стальных пластинок, определенный методом оптико-эмиссионной спектроскопии (СПЕКТРОПОРТ), следующий, % масс.: железо – 99,1; углерод – 0,156; сера – 0,0242; никель – 0,011; алюминий – 0,004; кобальт – 0,0102; медь – 0,0091; титан – 0,0022; прочие примеси – 0,6833. Результаты представлены на рисунке 2.

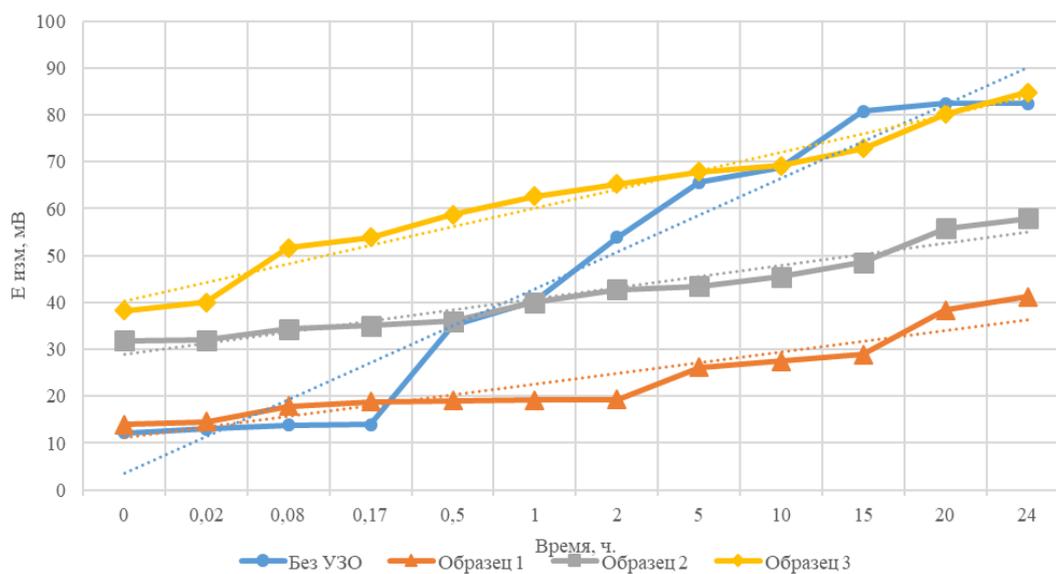


Рисунок 2. – Влияние удельной энергии ультразвуковой обработки сульфонатной присадки на изменение электродных потенциалов пакета присадок

Анализ полученных данных свидетельствует о существенных различиях в поведении исследуемых пакетов присадок. Наиболее низкие значения электродного потенциала на протяжении всего периода наблюдения демонстрирует образец № 1 ($y_2 = 2,299x + 8,7652$, $R^2 = 0,8687$), что указывает на его минимальную антикоррозионную активность. Кривые для образцов без УЗО ($y_1 = 7,8493x - 4,1621$, $R^2 = 0,9512$) и № 2 характеризуются умеренным ростом потенциала, при этом образец № 2 ($y_3 = 2,3689x + 26,544$, $R^2 = 0,9433$) стабильно превосходит образец № 1 по защитным свойствам, что согласуется с результатами, полученными при введении нейтрального сульфоната кальция.

Наибольшие значения электродного потенциала в течение всего времени испытания наблюдаются у образца № 3 ($y_4 = 3,9507x + 36,445$, $R^2 = 0,9695$), подвергнутого ультразвуковой обработке высокощелочного сульфоната кальция и фената кальция. Уже на начальных стадиях (0,02–0,5 ч) потенциал образца № 3 превышает показатели других образцов, а к концу испытания (24 ч) достигает максимальных значений, свидетельствуя

о формировании наиболее эффективной защитной пленки на поверхности металла. Для образца без УЗО также отмечается значительный рост потенциала после 1 ч экспозиции, что может быть связано с особенностями последовательности смешивания компонентов.

Полученные результаты однозначно свидетельствуют, что наибольшее снижение электрохимической коррозии стали наблюдается при обработке ультразвуком фенолятной присадки. При обработке сульфонатной присадки ультразвуком электрохимическая коррозия тоже снижается, но в меньшей степени. Однако при одновременной обработке ультразвуком обеих присадок электрохимическая коррозия стали увеличивается.

Результаты измерения электродного потенциала подтверждают, что ультразвуковая обработка высокощелочных компонентов пакета присадок способствует существенному увеличению антикоррозионной активности, что проявляется в более высоких и стабильных значениях электродного потенциала по сравнению с необработанными образцами. Полученные данные коррелируют с результатами оценки коррозионной стойкости по показателю K и подтверждают эффективность предлагаемого метода модификации присадок.

Установлено, что обработка ультразвуком высокощелочных фенолятной и сульфонатной присадок непосредственно перед вводом в пакет присадок не оказывает влияния на окислительную стабильность смазочных масел. По методу ASTM D6186 индукционный период окисления исследуемых образцов пакетов присадок при температуре 210 °С и давлении кислорода 3,5 МПа составляет 15–16 мин.

Результаты устойчивости пакета присадок к осадкообразованию представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Устойчивость к осадкообразованию пакетов присадок.

Образец	Осадок, %
№ 1	0,02
№ 2	0,03
№ 3	0,02

Таким образом, полученные значения существенно ниже порогового уровня 0,05%, установленного стандартом, что свидетельствует о высокой коллоидной стабильности исследуемых пакетов присадок. Небольшое различие между образцами не превышает погрешность метода и не оказывает значимого влияния на эксплуатационные характеристики. Эти результаты подтверждают эффективность выбранных составов и технологических режимов приготовления пакетов.

Заключение. Проведенные исследования подтвердили, что ультразвуковая обработка высокощелочного сульфоната кальция и фенолата кальция существенно улучшает антикоррозионные свойства пакетов присадок к смазочным маслам. Оптимальная удельная энергия ультразвуковых колебаний составляет не более 500 Дж/см³, при которой достигается максимальное повышение защитных характеристик без ухудшения стабильности и склонности к осадкообразованию. Измерения электродного потенциала показали формирование более устойчивой и эффективной защитной пленки на поверхности металла при использовании ультразвуковых методов. Все образцы пакета присадок демонстрируют высокую устойчивость к осадкообразованию, что гарантирует сохранение их функциональных свойств и предотвращение образования отложений в смазочных материалах при длительном хранении и эксплуатации. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности внедрения ультразвуковой обработки в технологию производства пакетов присадок для повышения их эксплуатационных свойств и долговечности смазочных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шехтер Ю.Н. Защита металлов от коррозии (ингибиторы, масла и смазки). – М., Л.: Химия, 1964. – 120 с.
2. Богданова Т.И., Шехтер Ю.Н. Ингибированные нефтяные составы для защиты от коррозии. – М.: Химия, 1984. – 248 с.
3. Специальные технологии переработки природных энергоносителей: Производство присадок и пакетов присадок к маслам: учеб.-метод. комплекс / С.В. Покровская, И.В. Бурая, Ю.А. Булавка и др. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2013. – 94 с.
4. Антикоррозионные свойства сульфонатных присадок / Г. Аннаев, А.А. Ермак, Н.А. Советников и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 1(49). – С. 107–111. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-107-111
5. В 225 Защита металлов от коррозии: Практикум / А.Ю. Вахрушев, И.С. Михайлова, Т.Л. Луканина и др. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2024. – 52 с.

REFERENCES

1. Shekhter, Yu.N. (1964). *Zashchita metallov ot korrozii (ingibitory, masla i smazki)*. Moscow, Leningrad: Khimiya. (In Russ.).
2. Bogdanova, T.I. & Shekhter, Yu.N. (1984). *Ingibirovannyye neftyanye sostavy dlya zashchity ot korrozii*. Moscow: Khimiya. (In Russ.).

3. Pokrovskaya, S.V., Buraya, I.V., Bulavka, Yu.A., Babushkin, M.O. & Zavadskii, A.V. (2013). *Spetsial'nye tekhnologii pererabotki prirodnnykh energositelei: Proizvodstvo prisadok i paketov prisadok k maslam*. Novopolotsk: Polotsk state University. (In Russ.).
4. Annaev, G., Ermak, A.A., Sovetnikov, N.A. & Mammedov, B.M. (2024). Antikorrozionnye svoistva sul'fonatnykh prisadok [Anticorrosive Properties of Sulfonate Additives]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 1(49), 107–111. DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-107-111 (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Vakhrushev, A.Yu., Lukanina, T.L. & Ardasheva, L.P. (2024). *V 225 Protection of metals from corrosion: Practicum*. Saint Petersburg: VShTE. SPbGUPTD. (In Russ.).

Поступила 30.06.2025

STUDY OF THE EFFECT OF ULTRASONIC TREATMENT OF SULFONATE AND PHENATE ADDITIVES ON ANTICORROSIVE ACTIVITY AND RESISTANCE TO SLUDGE FORMATION OF A PACKAGE OF ADDITIVES TO LUBRICATING OILS

G. ANNAYEV

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

In the article the influence of ultrasonic treatment of sulfonate and phenate additives on anticorrosive activity and resistance to sludge formation of additive packages to lubricating oils is considered. Samples of packages with different composition and mixing technology, including treatment of high alkaline calcium sulfonate and calcium phenate by ultrasonic vibrations with frequency of 20-30 kHz have been investigated. It was found that the use of ultrasound with specific energy up to 500 J/cm³ allows increasing the anticorrosive activity of the additive package by 2.8 times without adverse effect on the tendency to precipitation and oxidative stability. The change in the electrode potential of metals confirms the improvement of the protective properties of the treated packages. The results open perspectives for improving the efficiency of additive systems in lubricants of internal combustion engines.

Keywords: *ultrasonic treatment, sulfonate additives, phenate additives, additive packages, anticorrosive activity, precipitation, lubricating oils, electrode potential.*

УДК 665.77; 544.72

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-98-104

УГЛЕРОДНЫЙ МАТЕРИАЛ, ПОЛУЧЕННЫЙ ИЗ НЕФТЯНОГО КОКСА И ОТХОДОВ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА

Д.С. ЮХНО

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-2610-9832>

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Исследовано получение углеродных сорбентов путем совместной термообработки сернистого нефтяного кокса и отходов полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Установлено, что введение от 25 до 30% масс. ПЭТФ в смесь с измельченным нефтяным коксом с последующей ее грануляцией и активацией в инертной среде при температуре от 370 до 600 °С позволяет получить материал с хорошими адсорбционными свойствами. Представлены изотермы адсорбции/десорбции азота при 77 К для полученных сорбентов и исходного нефтяного кокса. С использованием метода компьютерного моделирования GCMC (Grand Canonical Monte Carlo method) установлены закономерности распределения пор в полученных сорбентах. Приведены результаты анализа ИК-спектров продукта, получаемого в процессе активации смесей нефтяного кокса с ПЭТФ. Установлено, что полученный сорбент эффективен для адсорбционной очистки растворов метилдиэтиламина.

Ключевые слова: нефтяной кокс, полиэтилентерефталат, активация, адсорбент, ИК-спектрометрия, метилдиэтиламин.

Введение. Поиск путей рационального использования сернистого нефтяного кокса и получение из него продуктов с высокой добавленной стоимостью в настоящее время является актуальной задачей. Одними из таких продуктов могут быть сорбенты различного назначения.

Процесс получения активированных углей из нефтяного кокса сводится к его частичной декарбонизации с выделением газообразных продуктов при условиях реакции. Известно, что уже существуют технологии получения углеродных сорбентов из нефтяного кокса методами парогазовой^{1, 2} [1] и химической³ [2–4] активации. В качестве активирующих агентов при химической активации могут применяться различные кислоты, щелочи и соли [3], способные вступать в окислительно-восстановительные реакции с углеродом кокса. Однако благодаря особенностям структуры и химическому составу нефтяного кокса помимо вышеуказанных способов активации для получения сорбентов специального назначения с заданной селективностью и уникальными свойствами могут быть использованы и другие способы активации.

Так, одним из крупнотоннажных полимерных отходов является полиэтилентерефталат (ПЭТФ). Он является достаточно стойким полимером, и его разложение в естественных условиях протекает крайне медленно. В связи с этим поиск путей переработки и утилизации отходов полиэтилентерефталата также является актуальной задачей⁴.

Цель проведенных исследований – разработка технологии получения адсорбентов технического назначения на основе кокса процесса замедленного коксования нефтяных остатков и отходов полиэтилентерефталата и оценка влияния температуры термообработки на свойства получаемого сорбента.

Исследовательская часть. В эксперименте использовался нефтяной кокс процесса замедленного коксования нефтяных остатков с содержанием летучих веществ 8,5% масс. и содержанием серы 4,1% масс. Исходный измельченный нефтяной кокс (с размером частиц менее 100 мкм) смешивался до однородной массы с отходами ПЭТФ при их содержании в смеси 25–30% масс. при температуре плавления ПЭТФ, что составляет 260±30 °С, с последующей горячей грануляцией смеси методом экструзии, и затем полученные гранулы подвергались термообработке в трубчатой печи при температуре 370–600 °С при продувке азотом в среднем в течение 30 мин. Для приготовления образца сравнения измельченный нефтяной кокс в закрытой емкости смешивался с водой, взятой в количестве 10% от массы кокса. Полученная смесь выдерживалась 2 ч при температуре 900 °С с подачей воздуха до обгара 30–45%. Состав образцов и условия их термообработки представлены в таблице 1.

¹ Тагиров М.А. Технология получения активированного углеродного материала на основе нефтяного кокса: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Уфа, 2014. – 110 л.

² Способ определения времени активации поверхности нефтяного кокса: пат. RU 2011120526 / М.А. Тагиров, Б.С. Жирнов, В.А. Будник, Е.В. Гостыков. – Оpubл. 27.12.2012.

³ Баширов И.И. Получение формованного углеродного адсорбента из нефтяного сырья методами паровой и щелочной активации: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07. – Уфа, 2016. – 121 л.

⁴ URL: https://vk.com/wall-97678647_274

Таблица 1. – Состав образцов и условия их термообработки

Номер примера	Содержание отхода ПЭТФ, % масс.	Температура термообработки, °С
1	–	900 ± 2
2	25	400 ± 2
3	25	500 ± 2
4	30	370 ± 2
5	30	400 ± 2
6	30	450 ± 2
7	30	500 ± 2
8	30	600 ± 2

Нижний предел содержания отходов ПЭТФ в смеси 25% масс. связан с тем, что при меньшем содержании отходов ПЭТФ гранулы при термообработке рассыпаются. Верхний предел содержания отходов ПЭТФ в смеси 30% масс. – с тем, что при большем содержании ПЭТФ гранулы при термообработке спекаются.

Нижний предел температуры термообработки определяется началом выделения продуктов термодеструкции активируемых образцов. Верхний связан с разрушением гранул образца.

Затем для полученных образцов определяли адсорбционные характеристики. Удельная площадь поверхности по методу БЭТ определялась путем низкотемпературной адсорбции азота при 77 К на приборе BELSORP MAX производства компании MicrotracBEL Corp. (Япония). Адсорбционная активность по индикатору метиленовому голубому в миллиграммах на грамм сорбента – по ГОСТ 4453-74 п. 4.4.

Полученные изотермы адсорбции/десорбции азота свидетельствуют об относительно сильном взаимодействии азота с поверхностью образцов. Из рисунка 1 видно, что присутствие ПЭТФ при термообработке кокса приводит к увеличению объема адсорбированного азота на грамм исследуемого образца. При этом увеличивается удельная площадь поверхности и суммарный объем пор образцов (таблица 2).

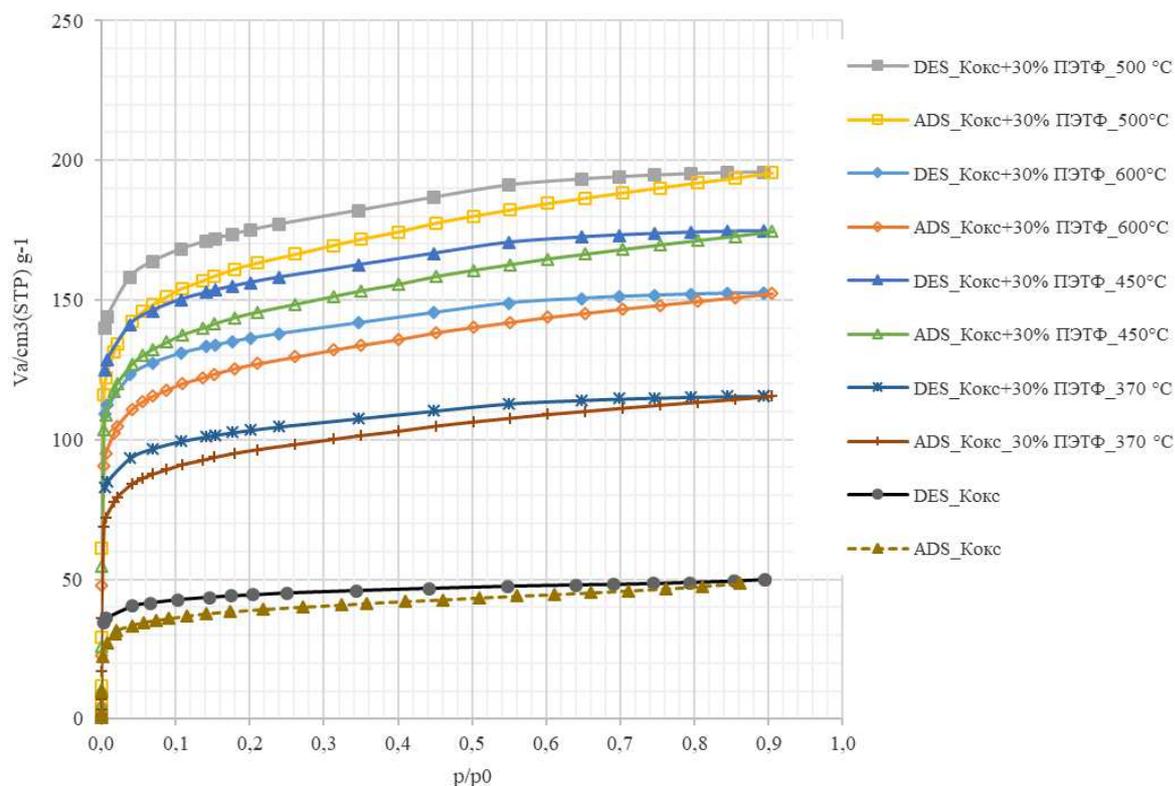


Рисунок 1. – Изотермы адсорбции (ADS) и десорбции (DES) азота при 77 К образцов активированного кокса и смесей кокса с ПЭТФ

Повышение температуры термообработки образцов приводит к увеличению их удельной площади поверхности. Дальнейшее повышение температуры термообработки выше 500 °С, наоборот, приводит к снижению удельной площади поверхности образцов. Повышение содержания ПЭТФ в образцах с 25% масс. до 30% масс. позволяет при термообработке увеличить их удельную поверхность примерно на 200 м²/г.

С увеличением содержания ПЭТФ в образцах и температуры термообработки количество получаемого сорбента снижается (рисунок 2).

Таблица 2. – Характеристики полученных образцов

Показатель	Температура активации образца кокса с ПЭТФ							
	0% масс. ПЭТФ	25% масс. ПЭТФ		30% масс. ПЭТФ				
	900 °С	400 °С	500 °С	370 °С	400 °С	450 °С	500 °С	600 °С
Удельная поверхность по БЭТ, м ² /г	142,81	238,45	381,41	354,32	466,41	535,18	599,68	467,19
Адсорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г	107	157	180	162	208	217	226	203
Объем пор (БЭТ), см ³ (СТР)/г	32,811	54,784	87,631	81,406	107,16	122,96	137,78	107,34
Средний диаметр пор, нм	2,17	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02
Удельная поверхность по Ленгмюру, м ² /г	210,8	331,77	530,69	492,99	657,71	754,72	845,65	658,84
Объем пор (Ленгмюр), см ³ (СТР)/г	48,432	76,225	121,93	113,27	151,11	173,40	194,29	151,37
V	0,2915	0,6073	0,6073	0,6073	0,4033	0,4033	0,4033	0,6073
Энергия адсорбции по методу ДА, кДж/мол	5,6560	6,2856	5,4259	6,3260	6,2856	6,277	6,272	6,2973
Выход углеродного сорбента, % масс.	65,8	78,3	72,9	77,5	75,4	71,8	64,6	61,8

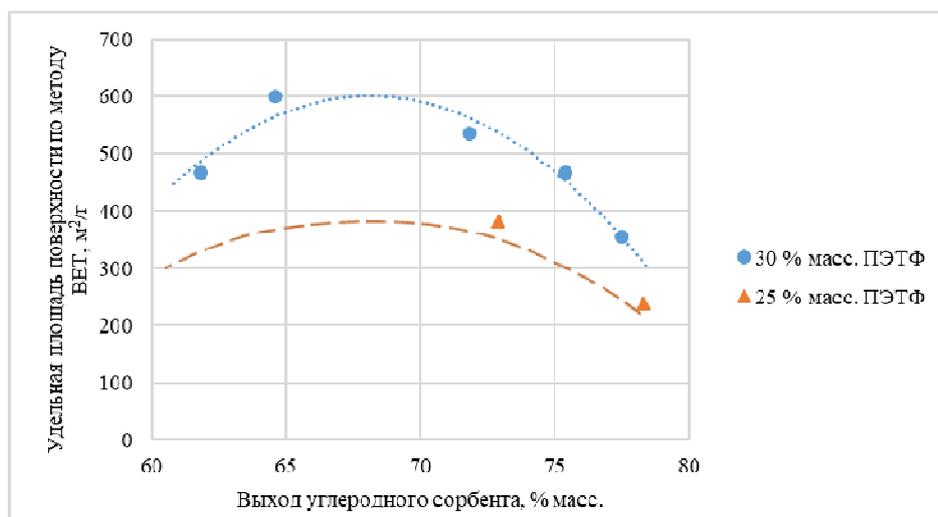


Рисунок 2. – Зависимость изменения удельной поверхности образцов сорбента от его выхода в процессе активации

Результаты проведенных исследований показывают, что, как с точки зрения удельной площади поверхности, так и с точки зрения выхода образцов, наиболее оптимальными параметрами являются содержания ПЭТФ в образцах 30% масс. и температура термообработки в пределах 490–510 °С.

Средний диаметр пор, определенный по методу ВЕТ, не изменяется при различных условиях термообработки образцов при их различном составе. Характеристическая энергия адсорбции азота, определенная по методу Дубинина–Астахова, у образцов кокса с ПЭТФ также выше, чем у образца-сравнения (активированный образец из кокса, пропитанный водой).

Для анализа распределения пор по размерам был использован метод компьютерного моделирования GCMC (Grand Canonical Monte Carlo method), в котором точно решается строгая молекулярно-уровневая модель адсорбции, основанная на выбранной модели формы пор [5–7]. В данном методе в графитизированных углеродных материалах путем анализа изотерм адсорбции азота при 77 К возможно проводить оценку распределения пор щелевидной и цилиндрической форм во всем диапазоне размеров от микро- до макропор.

При использовании метода GCMC установлено, что в исследуемых образцах присутствуют микро- и мезопоры цилиндрической и щелевидной форм.

При добавлении ПЭТФ к нефтяному коксу суммарный объем в нем пор щелевидной и цилиндрической форм увеличивается минимум в 1,6 и 1,5 раза соответственно (таблица 3). При этом наибольшее изменение

объема приходится на микропоры щелевидной формы и мезопоры цилиндрической формы – минимум в 1,8 раз. Объем мезопор щелевидной формы увеличивается на минимум 22,9%, а микропор цилиндрической формы – на минимум 33,5%. Однако основной вклад в увеличение объема вносят микропоры щелевидной формы, а также микро- и мезопоры цилиндрической формы с преобладанием доли микропор. Аналогичные тенденции наблюдаются и в изменениях удельной площади поверхности пор (таблица 3). Макропор в исследуемых образцах не обнаружено.

Таблица 3. – Распределение пор образцов по методу GCMC

Вид пор	АГ-3 ГОСТ 20464	Температура активации образца кокса с ПЭТФ и содержание ПЭТФ							
		900 °С, 0% масс.	400 °С, 25% масс.	500 °С, 25% масс.	370 °С, 30% масс.	400 °С, 30% масс.	450 °С, 30% масс.	500 °С, 30% масс.	600 °С, 30% масс.
Объем щелевидных пор, см ³ /г									
Микропоры	0,2322	0,0478	0,0866	0,1386	0,1288	0,1695	0,1945	0,2179	0,1698
Мезопоры	0,1454	0,0192	0,0236	0,0379	0,0351	0,0462	0,0530	0,0594	0,0463
Удельная поверхность щелевидных пор, м ² /г									
Микропоры	351,81	66,709	158,34	253,28	235,29	309,71	355,39	398,21	310,24
Мезопоры	83,29	9,139	12,31	19,68	18,28	24,07	27,61	30,94	24,11
Объем цилиндрических пор, см ³ /г									
Микропоры	0,201	0,0627	0,0837	0,1339	0,1244	0,1638	0,1879	0,2106	0,164
Мезопоры	0,3959	0,0401	0,0704	0,1126	0,1046	0,1376	0,1580	0,1769	0,1379
Удельная поверхность цилиндрических пор, м ² /г									
Микропоры	468,17	131,56	236,98	379,06	352,13	463,52	531,88	595,97	464,31
Мезопоры	312,60	23,64	79,52	127,21	118,18	155,55	178,49	199,99	155,82

В ходе термообработки образцов наблюдалось выделение из зоны реакции белого дыма с последующим охлаждением на воздухе и десублимацией (депозицией) в белый порошок, который быстро приобретал желтый оттенок и имел ванильный запах. Данный порошок был подвергнут анализу (рисунок 3).

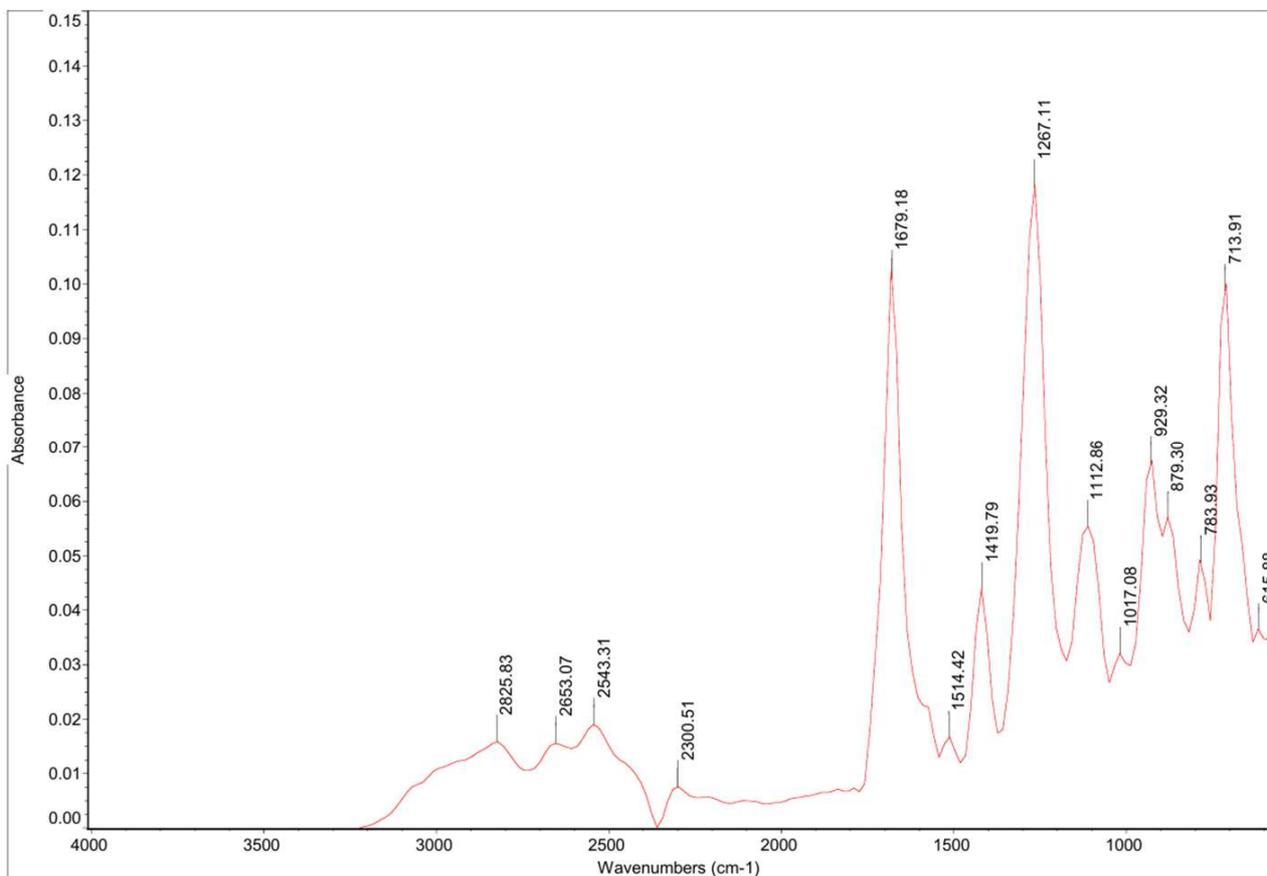


Рисунок 3. – ИК-Фурье спектрометрия образующегося при активации порошка

Проведенный термогравиметрический анализ полученного порошка показал, что кривые изменения массы (ТГА) и дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) при испытаниях в воздушной и инертной (азот) средах практически идентичны. Это свидетельствует о том, что процессы разложения происходят одинаково независимо от наличия кислорода, что характерно для термического разложения. Материал распадается под действием температуры по одним и тем же механизмам и в те же температурные интервалы как в азоте, так и на воздухе. Т.е. продукты термодеструкции ПЭТФ с повышением температуры подвергаются не окислению, а разложению.

На основе анализа ИК-спектра можно предположить, что порошок содержит ароматические кислородсодержащие соединения. Так, на характерную для карбоновых кислот связанную группу ОН, указывает широкий комплекс слабых полос в диапазоне 3300–2500 см⁻¹. Интенсивная полоса при 1679 см⁻¹ характерна для карбонильных групп (C=O), для ароматических колец (C=C) характерна полоса при 1514 см⁻¹. Сильная полоса при 1267 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям С-О в карбоновых кислотах, но также и в фенолах (Ar-OH) и арилалкиловых эфирах (Ar-O-CH₃), однако для них требуются дополнительные маркеры.

Идентификация комбинации полос в области 900–650 см⁻¹ позволяет предположить, что в ароматическом кольце возможно наличие как монозамещения, так и ди- и три-(1,2,4- или 1,3,5-) замещения.

В процессе термической деструкции ПЭТФ при умеренных температурах основными продуктами деструкции ПЭТФ являются бензойная кислота, терефталевая кислота и монометилтерефталат, а также оксиды углерода. При этом также протекают реакции образования продуктов карбонизации и конденсации, которые усиливаются с ростом температуры [8].

Продукты неполной дегградации ПЭТФ, такие как моноэтиленгликольтерефталат (МНЕТ) и диэтиленгликольтерефталат (ВНЕТ), предположительно, не должны являться компонентами порошка, поскольку в ИК-спектре не наблюдаются сильные пики в диапазоне 1730–1715 см⁻¹ и 1300–1100 см⁻¹, характерные для сложных эфиров. Также отмечается, что при нагревании диэтиленгликольтерефталата до 300 °С происходит выделение этиленгликоля, а при нагревании диэтиленгликольтерефталата до температуры 450 °С – его разложение⁵. К тому же, на ИК-спектре порошка отсутствуют характерные для этиленгликоля широкая полоса ОН около 3600 см⁻¹ и сильный пик С-О при 1050–1080 см⁻¹, что свидетельствует о том, что этиленгликоль претерпел превращения.

Для димерных карбоновых кислот, которой является терефталевая кислота, характерным отличием является сильный и широкий пик в диапазоне 3300–2500 см⁻¹, которого не наблюдается в ИК-спектре порошка, что свидетельствует о том, что ее доля мала, а преобладает бензойная кислота.

На ИК-спектре не наблюдается характерная для альдегидов полоса средней интенсивности около 2720 см⁻¹ (С-Н). Но допустимо появление 2 слабых полос, и в области 2880–2650 см⁻¹ наблюдаются 2 слабых пика, которые в сочетании с полосой поглощения С=О (1679 см⁻¹) могут быть отнесены к альдегидным. Эфирный пик средней интенсивности в зоне около 2850 см⁻¹ (О-СН₃) может перекрываться связанной группой ОН карбоновых кислот. Характерный для группы О-Н фенолов интенсивный широкий пик в диапазоне 3600–3400 см⁻¹ не наблюдается. Таким образом, ванильный запах объясняется сложным процессом из-за малого (остаточного) количества обеспечивающих запах веществ, т.е. их концентрация ниже предела обнаружения ИК, но достаточна для ольфакторного восприятия. Возможно присутствие следов ванилиноподобных структур, но запах может являться и следом сложной смеси, например, бензальдегидов, суммарно создающих иллюзию «ванили». При этом возможно присутствие бензохинонов, которые в сочетании с указанными выше веществами сложной смеси могут придавать желтый оттенок полученному порошку.

Последующие исследования образцов термообработанного углеродного материала показали, что формованный активированный с ПЭТФ нефтяной кокс может быть использован в качестве адсорбента при очистке раствора метилдиэтанолamina (МДЭА).

Для полученного сорбента были проведены исследования по изучению процесса очистки циркулирующего раствора МДЭА процесса аминовой очистки газов. Для продления срока эксплуатации амина, снижения коррозионного воздействия и вспениваемости растворы МДЭА нуждаются в тщательной фильтрации на системе из трех последовательных фильтров, где основным является фильтр, заполненный активированным углем. Для исследований по очистке был взят образец регенерированного раствора МДЭА (после колонны регенерации амина), который по технологической схеме далее должен направляться в систему фильтрации. В качестве оценки эффективности фильтрации – изменения состояния раствора МДЭА после фильтрации, было выбрано изменение оптической плотности раствора, которая отражает степень прозрачности жидкости для световых лучей.

При пропускании регенерированного раствора МДЭА через образцы активированного углеродного материала на основе смеси нефтяного кокса и ПЭТФ оптическая плотность фильтрата при увеличении кратности раствора МДЭА к активированному коксу вначале снижается, а затем по мере насыщения адсорбента растет в направлении исходных значений (см. рисунок 4).

⁵ URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=16413>

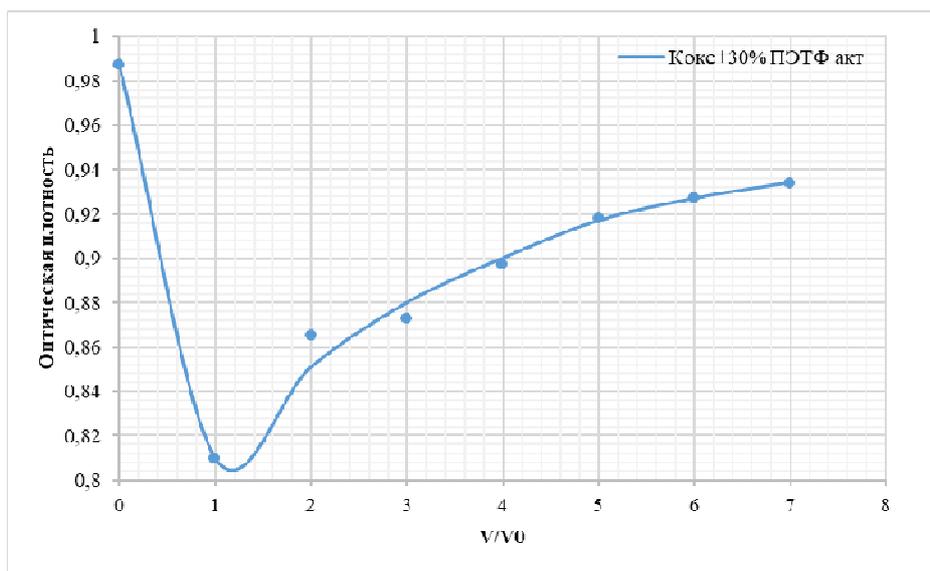


Рисунок 4. – Влияние отношения объема раствора МДЭА (V) к объему адсорбента (V_0) на изменение оптической плотности фильтра при длине волны проходящего света 500 нм

Заключение. Совместная активация нефтяного кокса с ПЭТФ позволяет относительно образца сравнения получить сорбент, эффективность которого зависит от содержания ПЭТФ в смеси и условий проведения термообработки. Полученный сорбент может быть использован для очистки циркулирующего раствора МДЭА (или другого амина) процесса аминовой очистки газов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Южно Д.С., Ермак А.А. Комплексная переработка высокосернистого нефтяного кокса // Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов: материалы V Всерос. науч. конф. / Иваново (30 июня – 2 июля 2021 г.). – Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2021. – С. 198–201.
2. Кугатов П.В., Кусалиев А.В., Жирнов Б.С. Получение углеродного адсорбента на основе сырого нефтяного кокса путем совместной карбонизации с гидроксидом калия // Кокс и химия. – 2019. – № 1. – С. 23–28.
3. Кугатов П.В., Жирнов Б.С. Формованный углеродный адсорбент на основе активированного гидроксидом калия нефтяного кокса // Химия и технология топлив и масел. – 2020. – № 3. – С. 22–25.
4. Исследование возможности переработки нефтяного кокса с повышенным содержанием летучих веществ в углеродные сорбенты / Е.А. Фарберова, А.С. Максимов, А.С. Ширкунов // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2021. – Т. 64, № 4. – С. 92–99. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6331
5. Modelling and Simulation in the Science of Micro- and Meso-Porous Materials / Eds.: C. Richard A. Catlow, Veronique Van Speybroeck and Rutger A. van Santen. – London, UK: Elsevier, 2017. – 370 p. DOI: 10.1016/C2015-0-04040-0
6. Adsorption equilibrium of polar/non-polar mixtures on MCM-41: experiments and Monte Carlo simulation / J.-H. Yun, Y. He, M. Otero et al. // Studies in Surface Science and Catalysis. Characterization of Porous Solids VI. – 2002. – Vol. 144. – P. 685–692. DOI: 10.1016/S0167-2991(02)80197-5
7. Monte Carlo Simulation and Experimental Studies of CO₂, CH₄ and Their Mixture Capture in Porous Carbons / P. Kohmucan, W. Inthomya, A. Wongkoblapp et al. // Molecules. – 2021. – Vol. 26, Iss. 9. – 2413. DOI: 10.3390/molecules26092413
8. Pyrolysis of polyethylene terephthalate) in a fluidised bed plant / T. Yoshioka, G. Grause, C. Eger et al. // Polymer Degradation and Stability. – 2004. – Vol. 86. – P. 499–504. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.06.001

REFERENCES

1. Yukhno, D.S. & Ermak, A.A. (2021). Kompleksnaya pererabotka vysokosernistogo neflyanogo koksa. *Aktual'nye problemy teorii i praktiki geterogennykh katalizatorov i adsorbentov: materialy V Vseros. nauch. konf. / Ivanovo (30 iyunya – 2 iyulya 2021 g.)* (198–201). Ivanovo: Ivan. gos. khim.-tekhnl. un-t. (In Russ.).
2. Kugatov, P.V., Kusaliyev, A.V. & Zhirnov, B.S. (2019). Poluchenie uglerodnogo adsorbenta na osnove syrogo neflyanogo koksa putem sovmestnoy karbonizatsii s gidroksidom kaliya [Preparation of carbon adsorbent based on raw petroleum coke by joint carbonization with potassium hydroxide]. *Koks i khimiya [Coke and chemistry]*, (1), 23–28. (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Kugatov, P.V. & Zhirnov, B.S. (2020). Formovanny uglerodnyy adsorbent na osnove aktivirovannogo gidroksidom kaliya neflyanogo koksa [Molded carbon adsorbent based on petroleum coke activated by potassium hydroxide]. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel [Chemistry and technology of fuels and oils]*, (3), 22–25. (In Russ., abstr. in Engl.).

4. Farberova, E.A., Maksimov, A.S., Shirkunov, A.S., Ryabov, V.G., Tin'gaeva, E.A. & Strelkov, V.A. (2021). Issledovanie vozmozhnosti pererabotki nefryanogo koksa s povyshennym sodержaniem letuchikh veshchestv v uglerodnye sorbenty [Research of possibility of processing petroleum coke with increased volatile substances into activated carbon]. *Izv. vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya [News of universities. Chemistry and chemical technology]*, 64(4), 92–99. DOI: 10.6060/ivkkt.20216404.6331 (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Catlow, C. Richard A. (Ed.), Van Speybroeck, Veronique (Ed.) & Van Santen, Rutger A. (Ed.). (2017). *Modelling and Simulation in the Science of Micro- and Meso-Porous Materials*. London, UK: Elsevier. DOI: 10.1016/C2015-0-04040-0
6. Yun, J.-H., He, Y., Otero, M., Düren, T. & Seaton, N. A. (2002). Adsorption equilibrium of polar/non-polar mixtures on MCM-41: experiments and Monte Carlo simulation. *Studies in Surface Science and Catalysis. Characterization of Porous Solids VI*, (144), 685–692. DOI: 10.1016/S0167-2991(02)80197-5
7. Kohmuean, P., Inthomya, W., Wongkoblup, A. & Tangsathitkulchai, C. (2021). Monte Carlo Simulation and Experimental Studies of CO₂, CH₄ and Their Mixture Capture in Porous Carbons. *Molecules*, 26(9), 2413. DOI: 10.3390/molecules26092413
8. Yoshioka, T., Grause, G., Eger, C., Kaminsky, W. & Okuwaki, A. (2004). Pyrolysis of polyethylene terephthalate) in a fluidised bed plant. *Polymer Degradation and Stability*, (86), 499–504. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2004.06.001

Поступила 30.06.2025

CARBON SORBENT DERIVED FROM PETROLEUM COKE AND POLYETHYLENE TEREPHTHALATE WASTE

D. YUKHNO

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article describes research on producing carbon sorbents through co-thermal treatment of sulfur-rich petroleum coke and polyethylene terephthalate (PET) waste. It was established that incorporating 25–30 wt.% PET into ground petroleum coke, followed by granulation and activation in an inert atmosphere at 370–600°C, yields a material with favorable adsorption properties. Nitrogen adsorption/desorption isotherms at 77 K for the synthesized sorbents and raw petroleum coke are presented. Using the Grand Canonical Monte Carlo (GCMC) modeling method, pore distribution patterns in the obtained sorbents were determined. Results of IR spectroscopy analysis of the by-product formed during activation of petroleum coke-PET mixtures are detailed. The resulting sorbent was proven effective for adsorptive purification of methyldiethanolamine solutions.

Keywords: petroleum coke, polyethylene terephthalate, activation, adsorbent, ir spectroscopy, methyldiethanolamine.

УДК 628.355

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-105-109

**ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ НЕФТЯНОГО КОКСА И ИЗБЫТОЧНОГО АКТИВНОГО ИЛА
ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГИДРОЛИЗНОГО ЛИГНИНА****В.А. ЕМЕЛЬЯНОВА**ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0507-0206>**А.М. ЕМЕЛЬЯНОВ**ORCID <https://orcid.org/0009-0005-5625-4506>

канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК

ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>*(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Показана необходимость поиска эффективного способа утилизации гидролизного лигнина, избыточного активного ила как крупнотоннажных промышленных отходов. На основе анализа научных источников сделан вывод о возможности их использования как компонента твердых топлив. Представлен химический состав и структура избыточного активного ила, гидролизного лигнина и высокосернистого нефтяного кокса. Произведен термогравиметрический анализ объектов исследования и смесей на их основе. Получены кривые дифференциальной сканирующей калориметрии нефтяного кокса, активного ила, гидролизного лигнина, а также смесей на их основе. Определены тепловые характеристики полученных образцов при нагревании до 900 °С в воздушной среде в зависимости от содержания нефтяного кокса и активного ила в смеси с гидролизным лигнином. На основе проведенных исследований сделаны выводы о возможности их использования в качестве компонента топлива.

Ключевые слова: *промышленные отходы, нефтяной кокс, активный ил, термогравиметрический анализ, гидролизный лигнин.*

Введение. Одна из актуальных задач рационального природопользования – решение проблемы утилизации крупнотоннажных промышленных отходов, в т.ч. и отходов биохимической промышленности – гидролизного лигнина. Накопленные промышленные отходы занимают значительные земельные территории, выступают источником загрязнения окружающей среды. Количество отходов гидролизного лигнина столь велики, что их можно рассматривать как вторичные техногенные сырьевые ресурсы [1].

Гидролизный лигнин представляет собой полидисперсный продукт с размером частиц до 1 см и является комплексом веществ, различных по химической природе. В него входит измельченный полимеризованный собственно лигнин, остатки полисахаридов, не отмытые при гидролизе моносахара, минеральные и органические кислоты, смолы, воски, азотистые вещества, зольные элементы. Кроме того, он содержит следы фурфурола или оксметилфурфурола и является по своей структуре сшитым полимерным продуктом, молекулярная масса которого, так же как и химическое строение, точно не определена.

Получаемый на заводах технический гидролизный лигнин обычно сильно загрязнен различными примесями и не идентичен по своему химическому строению, что значительно затрудняет его переработку и использование [2]. Направления использования гидролизного лигнина разнообразны. Перспективными для промышленного производства являются, например, сорбенты, активные угли, удобрения пролонгированного действия, а также в качестве топлива. Теплотворная способность гидролизного лигнина при влажности 60% составляет 7750 кДж/кг, при 65% – 6150 кДж/кг и при 68% – 5650 кДж/кг. Средняя теплотворная способность абсолютно сухого лигнина равна 24 870 кДж/кг [3].

Другим – наиболее трудным для утилизации – промышленным отходом являются остатки сточных вод. Таким остатком выступает избыточный активный ил с очистных сооружений. Он накапливается на иловых картах, что приводит к отчуждению плодородных земель, выделению и накоплению тяжелых металлов. Кроме того, активный ил имеет биологическую опасность за счет роста и развития многих патогенных микроорганизмов. В связи вышесказанным существует необходимость его утилизации.

Ил является многовидовым микробным сообществом, представляющим собой хлопья, при этом содержание минеральных частиц достигает 40%. В состав ила входят микроорганизмы различных групп, такие как актиномицеты, бактерии, грибы, вирусы, простейшие, членистоногие и многие др. [4]. Органическое вещество, содержащееся в сухом веществе активного ила, дает возможность рассматривать его как потенциальное топливо, что подтверждается сравнением элементного состава его органического вещества с углями, горючими сланцами и торфом [5]. Теплота сгорания осадка городских сточных вод на сухую массу составляет 20 000 кДж/кг, на сухую беззольную массу достигает 27 000 кДж/кг. Представленные данные позволяют заключить, что ак-

тивный ил близок по свойствам к торфам и бурым углям и делает возможным его топливное использование [5]. Однако ограничение топливного использования заключается в высокой зольности, большом содержании тяжелых металлов, образовании смолы при горении [6].

Нефтяной кокс относится к востребованным продуктам переработки нефти, применяемым в качестве сырья для изготовления электродов, восстановителя при выплавке алюминия из руд, топлива для металлургических заводов, а также для получения карбидов, изготовления проводников и огнеупоров. Кокс получают в процессе коксования тяжелых нефтяных остатков, который позволяет дополнительно получать ценные нефтепродукты и, тем самым, увеличивать глубину переработки нефти [7]. Однако высокосернистый нефтяной кокс является отходом нефтепереработки. Он представляет твердый остаток вторичной переработки нефти или нефтепродуктов [8]. Низкосортный высокосернистый кокс образуется при переработке нефтяных остатков с большим содержанием серы. Использование такого нефтяного кокса приводит к снижению теплоты сгорания кокса и увеличению количества выбрасываемых в атмосферу оксидов серы [9]. Такой кокс имеет низкую стоимость, и предприятия сталкиваются с трудностями при его реализации. Кроме того, в ряде государств имеются ограничения или даже запрет на использование нефтяного кокса [10].

Поиск экологически безопасных способов утилизации избыточного активного ила и гидролизного лигнина, а также нефтяного кокса на сегодня – актуальная тема. Как видно из проведенного анализа научной литературы и патентов, перспективным способом утилизации активного ила, лигнина и нефтяного кокса является его переработка как компонента твердых топлив.

Исследовательская часть. В качестве объекта исследований использовался избыточный активный ил с очистных сооружений, высокосернистый нефтяной кокс с установки замедленного коксования и гидролизный лигнин.

Избыточный активный ил с очистных сооружений ОАО «Слонимский картонно-бумажный завод «Альбертин»» образуется в процессе биологической очистки производственных сточных вод в аэротенках. В состав избыточного активного ила входит 92,2% влаги и 7,8% сухого вещества. Сухое вещество активного ила содержит более 59% органических веществ, а также такие элементы, как азот, фосфор и калий. Кроме этого, в избыточном активном иле содержатся небольшие количества (мг/кг) металлов: свинца, кадмия, марганца, хрома, никеля и цинка. При этом кислотный показатель активного ила составляет 7,8.

Высокосернистый нефтяной кокс установки замедленного коксования ОАО «Нафтан» представляет собой гранулы черного цвета, имеющие неправильную форму и металлический блеск, характеризуется наличием крупных пор, а также зернистой структурой. Микроструктура образцов кокса представляет собой мелко- и средневолокнистую структуру с размером волокон от 10 до 30 мкм. Насыпная плотность – 782,25 кг/м³. Содержание летучих соединений равно 8,5% масс. Кокс – высокоуглеродистое вещество (90,24% масс.). Характеризуется высоким содержанием серы – 4,1% масс., т.е. является высокосернистым. Также в состав нефтяного кокса входят ванадий, железо, кальций, кремний, никель, медь и натрий.

Гидролизный лигнин ОАО «Бобруйского завода биотехнологий» – высокоуглеродистое (62–70%) аморфное вещество темно-коричневого цвета. Лигнин представлен частицами размером от нескольких сантиметров до 1 мкм и менее. Насыпная плотность лигнина – 300–400 кг/м³. Содержание летучих веществ в гидролизном лигнине – 58–75%.

Для получения смесей, состоящих из гидролизного лигнина и 1, 3, 5, 10% масс. нефтяного кокса, а также лигнина и 1, 3, 5% масс. активного ила, лигнин подвергался предварительной просушке для уменьшения влажности образцов. Также активный ил подвергали сушке при 250 °С для уменьшения биологической опасности промышленного отхода. Нефтяной кокс предварительно дробился, а потом измельчался в мельнице для получения фракции менее 3 мм. Далее сырьевые компоненты смешивались в определенном соотношении и полученные образцы подвергали горячему формованию.

Термогравиметрический анализ для образцов гидролизного лигнина, нефтяного кокса, активного ила и их смесей проводился при помощи термогравиметрического анализатора LR-TGA101. Во время анализа температура повышалась со скоростью 10 °С/мин и устанавливалась максимальная температура в 900 °С. Результаты проведенных анализов представлены на рисунках 1–4.

На основе полученных данных (рисунки 1 и 2) можно сделать следующие выводы. Добавление 1–3% масс. активного ила к гидролизному лигнину приводит к увеличению диапазона горения смеси и максимальной температуры горения, по сравнению с чистым гидролизным лигнином. Максимальную теплоту сгорания показывает смесь, содержащая 1% масс. активного ила. Это объясняется тем, что добавление активного ила к гидролизному лигнину позволяет освободить связанную воду в избыточном активном иле. Это позволяет обезвожить активный ил и получить образец с более высокой теплотворной способностью.

Согласно рисункам 3 и 4, добавление нефтяного кокса до 10% масс. к гидролизному лигнину приводит к увеличению теплоты сгорания и максимальной температуры горения смесей по сравнению с чистым гидролизным лигнином. Также добавление нефтяного кокса приводит к прямо пропорциональному увеличению диапазона горения таких смесей. Однако количество добавляемого нефтяного кокса в смесь при сжигании необходимо ограничивать, т.к. в нем содержится много серы.

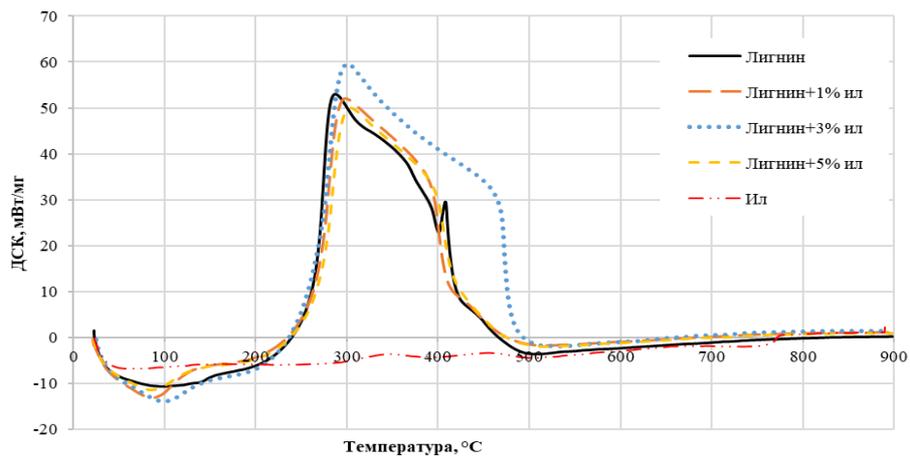


Рисунок 1. – Результаты дифференциальной сканирующей калориметрии активного ила, гидролизного лигнина и их смесей

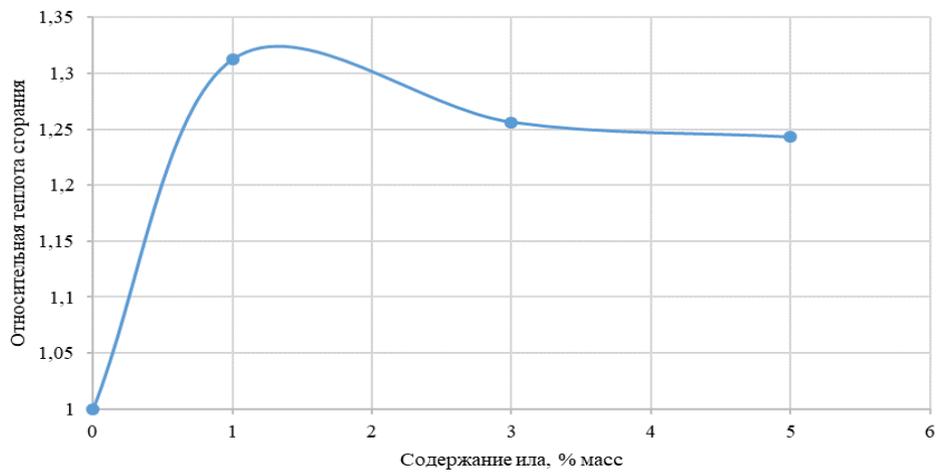


Рисунок 2. – Влияние добавки активного ила на относительную теплоту сгорания лигнина

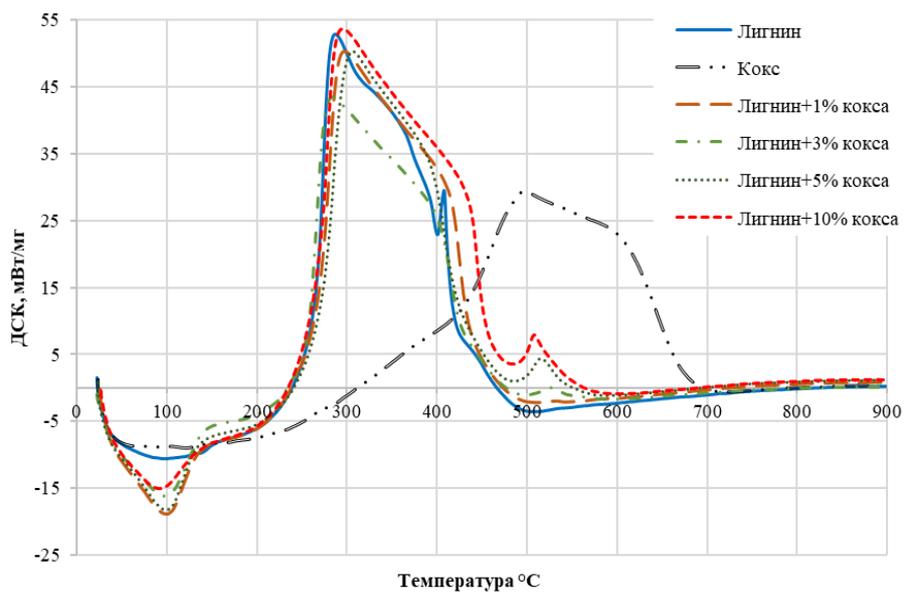


Рисунок 3. – Кривые дифференциальной сканирующей калориметрии нефтяного кокса, гидролизного лигнина и их смесей

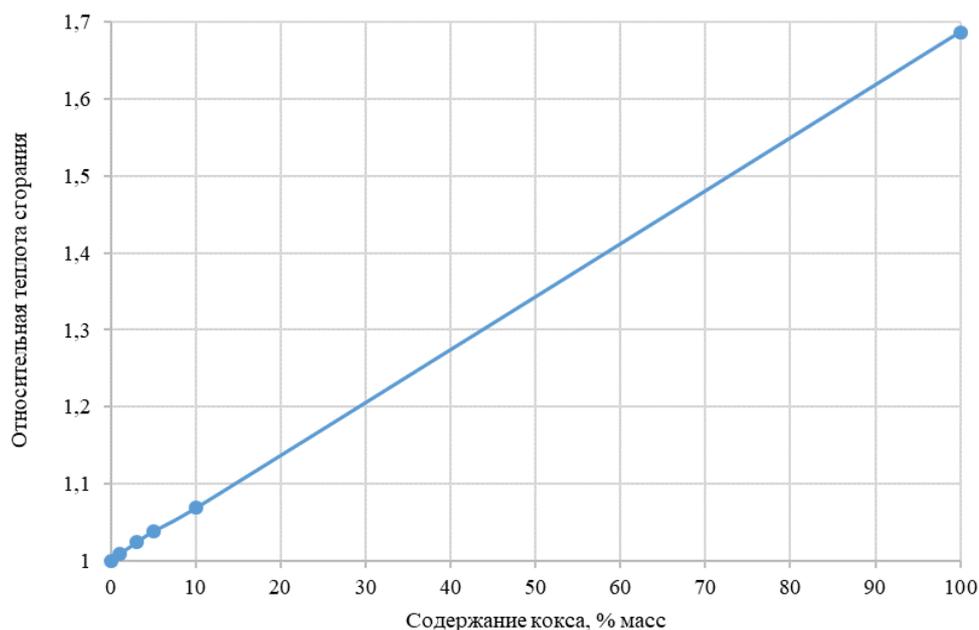


Рисунок 4. – Влияние добавки нефтяного кокса на относительную теплоту сгорания лигнина

Заключение. Таким образом, проведенные исследования показали, что возможна утилизация нефтяного кокса и избыточного активного ила совместно с гидролизным лигнином в качестве компонентов твердых топлив.

Добавление 1–3% масс. активного ила к гидролизному лигнину приводит к увеличению диапазона горения смеси и максимальной температуры горения, по сравнению с чистым гидролизным лигнином. Максимальную теплоту сгорания показывает смесь, содержащая 1% масс. активного ила. Это объясняется тем, что добавление активного ила к гидролизному лигнину позволяет освободить связанную воду в избыточном активном иле. Это позволяет обезвожить активный ил и получить образец с более высокой теплотворной способностью.

Добавление нефтяного кокса до 10% масс. к гидролизному лигнину приводит к увеличению теплоты сгорания и максимальной температуры горения смесей по сравнению с чистым гидролизным лигнином. Также добавление нефтяного кокса приводит к прямо пропорциональному увеличению диапазона горения таких смесей. Однако количество добавляемого нефтяного кокса в смесь при сжигании необходимо ограничивать, т.к. в нем содержится много серы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крутов С.М., Грибков И.В., Равицкий М.М. Связующее на основе продуктов щелочной деструкции гидролизного лигнина // Вестник ВНИИДРЕВ. – 2015. – № 4. – С. 9–11.
2. Любешкина Е.Г. Лигнины как компонент полимерных композиционных материалов // Успехи химии. – 1983. – Т. 52, № 7. – С. 1196–1224.
3. Болтовский В.С. Состав гидролизного лигнина из отходов ОАО «Бобруйский завод биотехнологий» и рациональные направления его использования // Тр. БГТУ. Сер. 2: Хим. технологии, биотехнология, геоэкология. – 2014. – № 4. – С. 105–108.
4. Емельянова В.А., Ермак А.А., Корнякова А.В. Влияние термической обработки на свойства избыточного активного ила // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2024. – № 2(50). – С. 116–122. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-50-2-116-122
5. Ушаков А.Г. Утилизация обезвоженного избыточного активного ила с получением топливных гранул // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 5. – С. 142–144.
6. Зайнуллина З.З., Зайнуллин Р.Х., Кутлин Н.Г. Методы утилизации избыточного активного ила // Инновационная наука. – 2023. – № 11-1. – С. 24–26.
7. Шлекова И.Ю., Кныш И.А. Снижение выбросов в окружающую среду при производстве нефтяного кокса на установках замедленного коксования // Теоретическая и прикладная экология. – 2020. – № 2. – С. 96–102.
8. Федорович Е.Г., Чиркун Т.Я., Левданский А.Э. Определение рациональных параметров процесса дробления твердых отходов нефтепереработки // Эпоха науки. – 2021. – №28. – С. 98–104.
9. Южно Д.С., Ермак А.А. Способы обессеривания нефтяного кокса (обзор) // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром-сть. Приклад. науки. – 2022. – № 10. – С. 121–127.
10. Южно Д.С., Ермак А.А. Комплексная переработка высокосернистого нефтяного кокса // Актуальные проблемы теории и практики гетерогенных катализаторов и адсорбентов: материалы V Всерос. науч. конф. (с междунар. участием) /

Россия, Костромская обл., Костромской р-н, д. Кузьминки (30 июня – 03 июля 2021 г.). – Иваново: ИГХТУ, 2021. – С. 198–201.

REFERENCES

1. Krutov, S.M., Gribkov, I.V. & Ravitskiy, M.M. (2015). Svyazuyushchee na osnove produktov shchelochnoy destruktсии gidroliznogo lignin. *Vestnik VNIIDREV*, (4), 9–11. (In Russ.).
2. Lyubeshkina, E.G. (1983). Ligniny kak komponent polimernykh kompozitsionnykh materialov. *Uspekhi khimii*, 52(7), 1196–1224. (In Russ.).
3. Boltovskiy, V.S. (2014). Sostav gidroliznogo lignina iz otvalov OAO «Bobruyskiy zavod biotekhnologii» i ratsional'ne napravleniya ego ispol'zovaniya. *Tr. BGTU. Ser. 2: Khim. tekhnologii, biotekhnologiya, geoekologiya*, (4), 105–108.
4. Emel'yanova, V.A., Ermak, A.A. & Korniyakova, A.V. (2024). Vliyaniye termicheskoy obrabotki na svoystva izbytochnogo aktivnogo ila [The Effect of Heat Treatment on the Properties of Excess Activated Sludge]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 2(50), 116–122. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-50-2-116-122 (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Ushakov, A.G. (2010). Utilizatsiya obezvozhennogo izbytochnogo aktivnogo ila s polucheniem toplivnykh granul. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tenicheskogo universiteta*, (5), 142–144. (In Russ.).
6. Zaynullina, Z.Z., Zaynullin, R.Kh. & Kutlin, N.G. (2023). Metody utilizatsii izbytochnogo aktivnogo ila. *Innovatsionnaya nauka*, (11-1), 24–26. (In Russ.).
7. Shlekova, I.Yu. & Knysh, I.A. (2020). Snizheniye vybrosov v okruzhayushchuyu sredu pri proizvodstve neftyanogo koksa na ustanovkakh za-medlennogo koksovaniya. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, (2), 96–102. (In Russ.).
8. Fedarovich, E.G., Chirkun, T.Ya. & Levdanskiy, A.E. (2021). Opredeleniye ratsional'nykh parametrov protsessa drobleniya tverdykh otkhodov neftepererabotki [Determination of Rational Parameters of the Process of Grinding Solid Waste Oil Refining]. *Epokha nauki*, (28), 98–104. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Yukhno, D.S. & Ermak, A.A. (2022). Sposoby obesserivaniya neftyanogo koksa (obzor) [Methods of Desulfurization of Petroleum Coke (Overview)]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, (10), 121–127. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Yukhno, D.S. & Ermak, A.A. (2021). Kompleksnaya pererabotka vysokosernistogo neftyanogo koksa. In: *Aktual'nye problemy teorii i praktiki geterogennykh katalizatorov i adsorbentov: materialy V Vseros. nauch. konf. (s mezhdunar. uchastiem) / Rossiya, Kostromskaya obl., Kostromskoy r-n, d. Kuz'minki (30 iyunya – 03 iyulya 2021 g.) (198–201)*. Ivanovo: IGKhTU. (In Russ.).

Поступила 21.05.2025

THE EFFECT OF THE ADDITION OF PETROLEUM COKE AND EXCESS ACTIVATED SLUDGE FROM SEWAGE TREATMENT PLANTS ON THE THERMOGRAVIMETRIC CHARACTERISTICS OF HYDROLYZED LIGNIN

V. YEMELYANOVA, A. YEMELYANOV, A. YERMAK
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The necessity of searching for an effective way to dispose of hydrolyzed lignin from excess activated sludge as large-scale industrial waste is shown. Based on the literature analysis, it is concluded that they can be used as a component of solid fuels. The chemical composition and structure of excess activated sludge, hydrolyzed lignin, and high-sulfur petroleum coke are presented. A thermogravimetric analysis of the study objects and mixtures based on them has been performed. Differential scanning calorimetry curves of petroleum coke, activated sludge, hydrolyzed lignin, and mixtures based on them have been obtained. The dependence of the thermal characteristics of the obtained samples upon heating to 900°C in an air environment is determined, depending on the content of petroleum coke and activated sludge mixed with hydrolyzed lignin. Conclusions were drawn based on the conducted research on the possibility of using them as a fuel component.

Keywords: industrial waste, petroleum coke, activated sludge, thermogravimetric analysis, hydrolyzed lignin.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОГРАНИЧЕНИЯ УСАДКИ
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЖЕСТКОЙ СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТНЫХ ПОР
В ПРОЦЕССЕ СПЕКАНИЯ ВОЛОКОН ИЗ Е-СТЕКЛА**

*д-р техн. наук, доц. С.М. АЗАРОВ, канд. техн. наук, доц. А.А. ДРОБЫШ,
Е.И. МИХАСИК, А.С. ЯНЕЦКАЯ*
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Приведены результаты исследований по моделированию величины усадки структур из тугоплавких неметаллических материалов с жесткой системой транспортных пор, сформированных спеканием волокон Е-стекла. На основании анализа расчетных характеристик и экспериментальных результатов показано, что в качестве приближенной модели для оценки усадки можно выбрать перколяционный подход для комбинации двух сред: среды в виде центров, ограничивающих усадку и формирующих пространственный скелет и среды в виде жесткой системы транспортных пор.

Ключевые слова: Е-стекло, волокно, свойства материала, структура, перколяционный кластер.

Введение. Пористые керамические материалы широко применяются для фильтрации во многих отраслях промышленности: химическом машиностроении, медицине, производстве продуктов питания, очистке воды и т.д. При этом материалы с жесткой системой транспортных пор, сформированной спеканием волокон Е-стекла, могут применяться в системах каталитического крекинга и очистки горячих газов, теплоизоляции элементов конструкций авиакосмической техники и т.д. Интерес к использованию Е-стекла основан на возможности формирования пористой волокнистой матрицы, обладающей высокой воздухопроницаемостью и меньшей на 250–350 °С по сравнению с базальтовыми волокнами температурой спекания, что делает такие материалы экономически привлекательными [1; 2].

В тоже время, как показывают эксперименты, пористые материалы из волокон Е-стекла характеризуются узким интервалом температур спекания. При 720 °С контактообразование не наблюдается, а при 780 °С происходит полное расплавление материала.

Микрометрический диаметр волокон Е-стекла (≤ 10 мкм) и жидкофазный механизм их спекания в диапазоне 730–770 °С являются причиной большой объемной усадки получаемых образцов. Значит, для высокотемпературного формирования из рассматриваемых волокон материала с жесткой системой транспортных пор при сохранении пористости и прочности необходимо создание центров, формирующих пространственный скелет и ограничивающих усадку. При этом важную роль в разработке технологических приемов получения пористых материалов из-за большого числа технологических факторов играет моделирование условий ограничения усадки, направленных на сохранение пористости на уровне более 50% и прочности свыше 15 МПа.

Целью данной работы является моделирование условий ограничения усадки при формировании жесткой системы транспортных пор в процессе спекания волокон Е-стекла.

Основная часть. Одним из способов создания центров является использование в качестве исходного материала гранул, представляющих собой мелкодисперсные частицы оксида кремния (ядра), окруженные оболочкой из рубленых волокон Е-стекла. При спекании такой композиции мелкодисперсные частицы оксида кремния SiO₂ из-за большой разницы в температурах плавления [3; 4] будут создавать условия ограничения усадки, а волокна Е-стекла за счет жидкофазного спекания формировать жесткую систему транспортных пор. Сложность создания высокопористых материалов заключается в определении минимального количества гранул, позволяющих сформировать заданную конструкцию. Поэтому задачу можно сформулировать следующим образом: при какой доле центров (при случайном их расположении) возникает цепочка, способная соединить противоположные стороны образца. При такой постановке одним из методов исследования по изучению пористых материалов является теория перколяции. Перколяция (percolation – протекание) изучает образование связанных объектов, называемых кластерами [5; 6]. Если кластер заполняет всю систему, его называют перколяционным. Порог перколяции – минимальная концентрация кластеров, при которой образец сохраняет форму.

Моделирование осуществляется путем заполнения квадратной решетки неперекрывающимися объектами. Такие исследования проводились в работах [7–9]. Данную систему можно рассматривать как модель пористой среды, где усадка определяется значением порога перколяции центров ограничения усадки, т.е. гранул с ядром из оксида кремния, окруженных оболочкой из хаотически расположенных волокон Е-стекла.

Для построения модели рассмотрим куб. Перколяционным кластером будем считать цепочку гранул, замыкающую две противоположенные стороны куба. Необходимо математически определить, при какой доле гранул куб распадется. Гранулы в виде сфер с ядром радиуса r и оболочкой из хаотически расположенных волокон радиуса d случайным образом упакованы в куб с линейным размером L .

Для расчетов использовали базовое понятие: матрица $A - n \times n$. Если элемент матрицы $a_{ij} = 1$, то данный узел решетки содержит гранулу; если $a_{ij} = 0$ – узел решетки содержит пору. Узлы заполняются с вероятностью p (параметр перколяции), где $0 \leq p \leq 1$. Для каждого узла генерируется случайное число (рандомное). Если оно меньше p , узел становится «пустым», т.е. не содержит гранулу.

Использовали следующий алгоритм генерации матрицы: создать случайную матрицу A размером $n \times n$ с элементами 0 или 1 согласно заданной вероятности p . Для этого проводили поиск связанных компонентов из «пустых» узлов. Если существует путь от любого «пустого» узла в верхней строке к любому «пустому» узлу в нижней строке, это значит, что гранул (центров ограничения усадки) недостаточно для формирования перколяционного кластера. В предложенном алгоритме каждый узел может иметь два состояния: 1 – узел является центром ограничения усадки; 0 – узел усадку не ограничивает.

Рассмотрим вариант реализации алгоритма на плоскости для матрицы $A 3 \times 3$. Тогда она имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{pmatrix},$$

и один из вариантов реализации может быть представлен как матрица вида

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Нужно определить, существует ли связный путь «пустых» узлов от верхней строки 1,1; 1,2; 1,3 до нижней строки 3,1; 3,2; 3,3. Начинали с узлов верхней строки и искали соединяющие пути до узлов нижней. Если такой путь существует, то система не содержит достаточное количество центров ограничения усадки. Начинаем с узлов 1,1 и 1,3, содержащих центры ограничения усадки. Узел 1,1 соединен с узлом 2,1. Узел 2,1 соединен с узлом 3,1 («пустым») и 2,2 (содержит центр ограничения усадки). Узел 2,2 соединен с 3,2 (содержит центр ограничения усадки). Таким образом, есть путь $(1,1) \rightarrow (2,1) \rightarrow (2,2) \rightarrow (3,2)$, ограничивающий усадку. Результат реализации алгоритма на языке программирования Python созданием рандомной решетки на плоскости при заданной вероятности $p = 0,5$ приведен на рисунке 1.

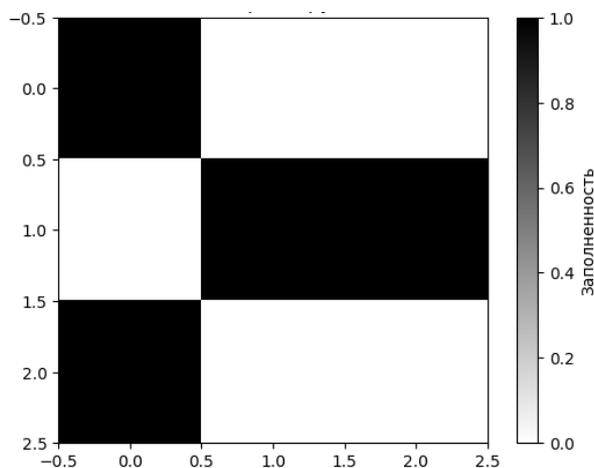


Рисунок 1. – Реализация рандомной решетки 3×3 на плоскости при вероятности $p = 0,5$

Видно, что при таком уровне вероятности центров ограничения усадки достаточно для создания связной системы, которая позволит материалу сохранить определенный уровень пористости при термообработке.

На рисунке 2 представлен вариант реализации в трехмерном пространстве матрицы $3 \times 3 \times 3$ рандомной решетки при вероятности $p = 0,5$.

Реализация алгоритма на языке программирования Python позволяет определить, гарантирует ли матрица $3 \times 3 \times 3$ при заданном уровне вероятности $p = 0,5$ наличие связной системы центров ограничения усадки в трехмерном пространстве. Визуализация результатов расчета, представленная на рисунке 2, указывает на отсутствие такой гарантии.

В случае моделирования условий ограничения усадки при формировании жесткой системы транспортных пор в процессе спекания волокон из Е-стекла две сферы принадлежат одному кластеру, если их оболочки пересекаются.

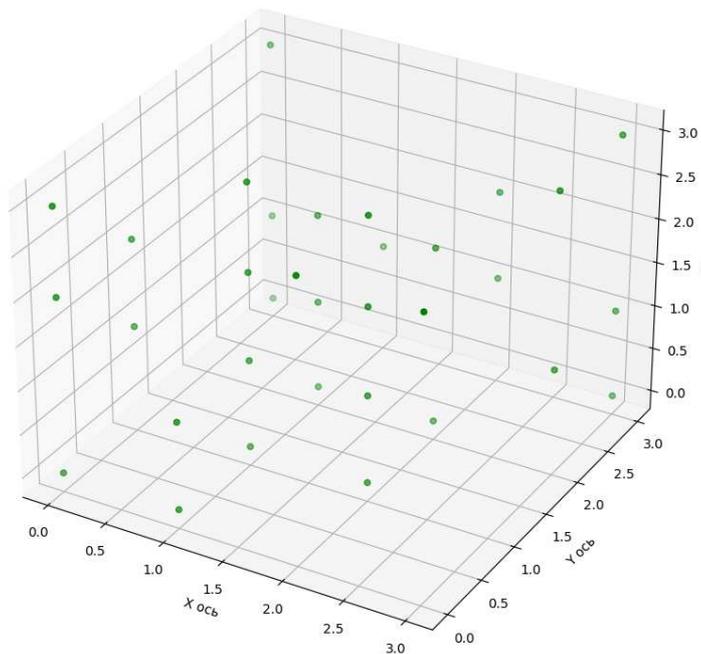


Рисунок 2. – Реализация случайной решетки в трехмерном пространстве при вероятности $p = 0,5$

Очевидно, что вероятность возникновения связи между сферами пропорциональна объему перекрытий их оболочек. Для нас представляет интерес в технологическом плане зависимость вероятности порога, гарантирующего наличие связной системы центров, ограничивающих усадку, от соотношения h радиусов оболочки и ядра центра d/r . Расчеты показывают, что вероятность связи увеличивается при увеличении доли упаковки центров в кубе, причем чем тоньше величина оболочки – вплоть до критического значения $h = 0,2$, тем значения вероятностей связей больше [10]. В то же время логично предположить, что при постоянном количестве центров меньшим значений, гарантирующих наличие связной системы, увеличение радиуса оболочки повысит вероятность создания перколяционного кластера.

Реализация случайной решетки $3 \times 3 \times 3$ для постоянного числа центров, имеющих радиус оболочки $d = 3r$, представлена на рисунке 3. Видно, что при вероятности $p = 0,5$ в данном варианте возникает перколяционный кластер из центров ограничения усадки при формировании жесткой системы транспортных пор с сохранением пористости и прочности.

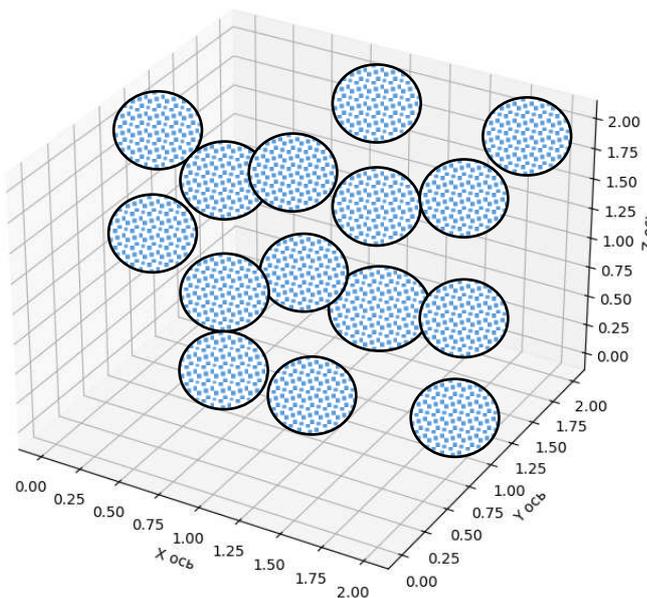


Рисунок 3. – Реализация случайной решетки в трехмерном пространстве при постоянном количестве центров ограничения усадки и величине оболочки $d = 3r$

Материал и методика исследований. Для подтверждения полученных модельных представлений проводили следующий эксперимент. Из гранул, сформированных из оксида кремния (ядро) размером 60–100 мкм и оболочки из рубленого волокна Е-стекла с добавлением пластификатора и порообразователя, прессовали на децимальном прессе экспериментальные образцы в виде цилиндров диаметром 17 мм и высотой 17 мм. Гранулы формировали с различным содержанием пластификатора. Полученные образцы спекали в воздушной атмосфере. Соотношение компонентов шихты и режимы спекания представлены в таблице. Режимы гранулирования подбирали таким образом, чтобы гарантировать создание структур, содержащих ядро и оболочку. Технологически установлено, что 10% оксида кремния в исходной шихте достаточно для формирования 100% гранул, содержащих в центре ядро. При 5% оксида кремния ядро содержат лишь 75% гранул. При 15% оксида кремния в шихте ядро содержат 80% гранул, при этом наблюдаются скопления частиц оксида кремния, хаотически расположенные вне гранул. При этом содержание 10% частиц оксида кремния в шихте позволяет получать материал с 50%-й пористостью, что оценочно соответствует заполнению пространства гранулами с вероятностью $p = 0,5$. Пористость образцов измерялась гидростатическим взвешиванием по ГОСТ 26450.1-85. Величина усадки рассчитывалась по формуле

$$\vartheta = \frac{V_0 - V_1}{V_0},$$

где V_0 и V_1 – объем образца до и после спекания соответственно.

Таблица. – Состав шихты и характеристики пористых спеченных образцов

№ серии	Содержание компонентов в шихте, % мас.	Объемная усадка/ пористость, %; температура спекания, °С					
1	Оксид кремния – 5 Волокно – 45 Порообразователь – 25 Пластификатор – 25		8,9 / 39		10,1 / 37		36,4 / 29
2	Оксид кремния – 10 Волокно – 45 Порообразователь – 25 Пластификатор – 20	730	6,9 / 53	750	8,4 / 50	770	30,3 / 31
3	Оксид кремния – 15 Волокно – 45 Порообразователь – 25 Пластификатор – 15		8,6 / 61		8,9 / 59		32,8 / 51

Обсуждение результатов исследований. Из представленных результатов следует, что усадка минимальна при спекании шихты 2, но пористость остается в диапазоне 50%, что подтверждают расчетные оценки на основе построения случайных решеток перколяции. Характерно, что усадка монотонно уменьшается с понижением температуры спекания. Если считать гранулы идеальными сферами, имеющими в центре ядро и 50–70% пористую оболочку из волокна Е-стекла, то из простых геометрических соотношений величина h уменьшается с 1,659 (серия 1) до 1,25 (серия 3). При этом увеличение объемного содержания пластификатора для образцов серии № 1 по сравнению с образцами серий № 2 и № 3 не приводит к росту пористости.

В работе [10] получена зависимость вероятности возникновения связи между сферами от доли заполнения ими объема для различных значений толщины оболочки. Установлено, что вероятность связи между сферами растет с увеличением плотности упаковки, причем чем тоньше толщина оболочки (уменьшение величины h), тем больше значения вероятности связи. Следовательно, возрастает вероятность того, что они принадлежат одному кластеру и создают условия уменьшения усадки.

В нашем случае, при использовании вместо сфер предлагаемых гранул, вероятность связи между ними и создание перколяционного кластера увеличивается, благодаря перекрытию пористых оболочек из волокон Е-стекла.

Заключение. Полученные результаты позволяют оценить как перспективные условия ограничения усадки при формировании жесткой системы транспортных пор в процессе спекания волокон из Е-стекла использованием гранул, содержащих оксидно-кремниевые ядра и пористые оболочки из рубленого Е-стекла. При моделировании условий ограничения усадки при формировании жесткой системы транспортных пор в процессе спекания волокон из Е-стекла можно выбрать перколяционный подход для комбинации двух сред: среды в виде центров, ограничивающих усадку, формирующих пространственный скелет, и среды в виде жесткой системы транспортных пор.

ЛИТЕРАТУРА

1. Структура и свойства пористых композиционных материалов на основе порошков алюмосиликатов и базальтового волокна / Е.Е. Петюшик, С.М. Азаров, А.А. Дробыш и др. // Порошковая металлургия: сб. науч. тр. – Минск: Бел. наука, 2018. – Вып. 41. – С. 147–152.
2. Губайдуллин А.А., Игошин Д.Е., Хромова Н.А. Обобщение подхода Козени к определению проницаемости модельных пористых сред из твердых шаровых сегментов // Вестн. Тюмен. гос. ун-та. Физ.-мат. моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 105–120. DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-105-120

3. Катализаторы на основе стекловолоконистых носителей. I. Физико-химические свойства кремнеземных стекловолоконистых носителей / Л.Г. Симонова, В.В. Барелко, О.Б. Лапина и др. // Кинетика и катализ. – 2001. – Т. 42, № 5. – Р. 762–772.
4. Катализаторы на основе стекловолоконистых носителей. II. Физико-химические свойства алюмоборосиликатных стекловолоконистых носителей / Л.Г. Симонова, В.В. Барелко, О.Б. Лапина и др. // Кинетика и катализ. – 2001. – Т. 42, № 6. – Р. 907–916.
5. Займан Д. Модели беспорядка. Теоретическая физика однороднонеупорядоченных систем. – М.: Мир, 1982. – 591 с.
6. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы: учеб. пособие. – М.: Едиториал УРСС, 2002. – 112 с.
7. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Теория протекания и проводимость сильно неоднородных сред // УФН. – 1975. – 117(3). – С. 401–436. DOI: 10.3367/UFNr.0117.197511a.0401
8. Тупицина А.И., Фадин Ю.А. Исследование проницаемости и перколяционных свойств систем твердых прямоугольных частиц методом компьютерного моделирования // ЖТФ. – 2016. – Т. 86, вып. 10. – С. 25–31.
9. Федосеев В.Б., Шишулин А.В. О распределении по размерам дисперсных частиц фрактальной формы // ЖТФ. – 2016. – Т. 91, вып. 1. – С. 39–44.
10. Бузмакова М.М. Перколяция сфер в континууме // Изв. Саратов. ун-та. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2012. – Т. 12, № 2. – С. 48–56. DOI: 10.18500/1816-9791-2012-12-2-48-56

REFERENCES

1. Petyushik, E.E., Azarov, S.M., Drobysh, A.A., Markova, L.V. & Gamzeleva, T.V. (2018). Struktura i svoystva poristyykh kompozitsionnykh materialov na osnove poroshkov alyumosilikatov i bazal'tovogo volokna [Structure and Properties of Porous Composite Materials Based on Powders of Aluminosilicate and Basalt Fiber]. In: *Poroshkovaya metallurgiya: sb. nauch. tr.*, (41), 147–152. Minsk: Belarus. Navuka. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Gubaydullin, A.A., Igoshin, D.E. & Khromova, N.A. (2016). Obobshchenie podkhoda Kozeni k opredeleniyu pronitsaemosti model'nykh pori-stykh sred iz tverdykh sharovykh segmentov [The Generalization of the Kozeny Approach to Determining the Permeability of the Model Porous Media Made of Solid Spherical Segments]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fi-ziko – matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika [Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy]*, 2(2), 105–120 DOI: 10.21684/2411-7978-2016-2-2-105-120 (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Simonova, L.G., Barelko, V.V., Lapina, O.B., Paukshtis, E.A., Terskiy, V.V., Zaykovskiy, V.I. & Bal'zhnimaev, B.S. (2001). Katalizatory na osnove steklovoloknistykh nositeley. I. Fiziko-khimicheskie svoystva kremnezemnykh steklovoloknistykh nositeley. *Kinetika i kataliz*, 42(5), 762–772. (In Russ.).
4. Simonova, L.G., Barelko, V.V., Lapina, O.B., Paukshtis, E.A., Terskiy, V.V., Zaykovskiy, V.I. & Bal'zhnimaev, B.S. (2001). Katalizatory na osnove steklovoloknistykh nositeley. II. Fiziko-khimicheskie svoystva alyumoborosilikatnykh steklovoloknistykh nositeley. *Kinetika i kataliz*, 42(6), 907–916. (In Russ.).
5. Zayman, D. (1982). *Modeli besporyadka. Teoreticheskaya fizika odnorodnoneuporyadochnykh sistem*. Moscow: Mir. (In Russ.).
6. Tarasevich, Yu.Yu. (2002). *Perkolyatsiya: teoriya, prilozheniya, algoritmy: ucheb. posobie*. Moscow: Editorial URSS. (In Russ.).
7. Shklovskiy, B.I. & Efros, A.L. (1975). Teoriya protekaniya i provodimost' sil'no neodnorodnykh sred. *UFN [Physics-Uspokhi]*, 117(3), 401–436. DOI: 10.3367/UFNr.0117.197511a.0401 (In Russ.).
8. Tupitsina, A.I. & Fadin, Yu.A. (2016). Issledovanie pronitsaemosti i perkolyatsionnykh svoystv sistem tverdykh pryamougol'nykh chastits metodom komp'yuternogo modelirovaniya. *ZhTF [Technical Physics]*, 86(10), 25–31. (In Russ.).
9. Fedoseev, V.B. & Shishulin, A.V. (2021). O raspredelenii po razmeram dispersnykh chastits fraktal'noy formy. *ZhTF [Technical Physics]*, 91(1), 39–44. (In Russ.).
10. Buzmakova, M.M. (2012). Perkolyatsiya sfer v kontinuumе [Percolation of Spheres in Continuum]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta Ser. Matematika, Mekhanika, Informatika [Izvestiya of Saratov University. Mathematics. Mechanics. Informatics]*, 12(2), 48–56. DOI: 10.18500/1816-9791-2012-12-2-48-56 (In Russ., abstr. in Engl.).

Поступила 30.05.2025

**SIMULATION OF CONDITIONS FOR LIMITING SHRINKAGE
DURING THE FORMATION OF A RIGID SYSTEM OF TRANSPORT PORE DURING THE SINTERING
PROCESS OF E-GLASS FIBERS**

S. AZARAU, A. DROBYSH, E. MIHASIK, A. JANEZKAJA
(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article presents the results of research on modeling and optimization of a structure made of refractory non-metallic materials with a rigid system of transport pores formed by sintering e-glass fibers. Based on the analysis of images of structures, it is shown that as an approximate model for calculating and optimizing characteristics, one can choose a percolation approach for a combination of two media: a medium in the form of centers that form a spatial skeleton and limit the shrinkage of the formed one and a medium in the form of a rigid system of transport pores. Moreover, the interpenetration of media is subject to normal distribution.

Keywords: E-glass, fiber, material properties, structure, percolation cluster.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

УДК 378.2

DOI 10.52928/2070-1616-2025-52-2-115-119

ДОКЛАД И НАУЧНАЯ ДИСКУССИЯ ПРИ ЗАЩИТЕ ДИССЕРТАЦИИ

*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Материал статьи способствует формированию содержательного, информативного и акцентированного доклада соискателя при защите диссертации. Приведена структура доклада из обязательных его элементов. Особое внимание уделено изложению положений, выносимых на защиту. Определено содержание научной дискуссии с рекомендациями по подготовке к ней и поведению соискателя.

Ключевые слова: диссертация, защита, доклад, презентация, дискуссия.

Введение. Доклад соискателя и последующая за ним научная дискуссия – основные элементы защиты диссертации, от содержания и изложения которых зависит итоговое решение в виде тайного голосования членов совета по защите диссертаций (далее, совета) о присуждении соискателю искомой ученой степени.

Часто бывает, что человек, перевернувший горы литературы, своими руками выполнивший сложные эксперименты и добившийся значимых результатов, из-за волнения или недостатка опыта докладывает диссертацию путем пересказа всего ее текста без акцента на ключевые элементы, что приводит к пропуску важных компонентов работы и потери ее информативности. Волнение преодолевают предыдущей психологической подготовкой, а недостаток опыта – различными выступлениями на научных мероприятиях.

На доклад при защите кандидатской диссертации отводится до 20 минут. Это время необходимо использовать максимально результативно, чтобы полно, обстоятельно, логично и убедительно изложить суть работы. Доклад соискателя – домашняя заготовка. Структура и содержание доклада, форма его подачи оказывают психологическое и эмоциональное воздействие на слушателей, в т.ч. на членов совета, которые принимают решение о качественной и количественной оценке защищаемой диссертации. Словесное изложение доклада сопровождаются незначительным напряжением голоса без торопливости. Пользуются терминами из терминологических стандартов или устоявшейся научной литературы.

Председатель заседания совета среди прочей информации объявит фамилию соискателя, тему диссертации, фамилию и должность научного руководителя, поэтому повторять эти сведения соискателем не следует, экономя каждую минуту времени, отведенного на доклад.

Доклад иллюстрируют графической презентацией (примерно 20–25 пронумерованных листов), представляющей собой блоки информации. Каждый лист презентации (кроме заставки) снабжают графиками, рисунками, методическими сведениями, зависимостями, текстом результатов и краткими выводами. Графики должны выражать характер изменения изучаемых величин со сведениями, подтверждающими соответствие теоретических положений практике и адекватность зависимостей экспериментальным данным. Все листы презентации сопровождаются комментариями, но дословно читать фрагменты текста не следует (это раздражает, присутствующие сами умеют читать). Размер шрифта текста и изложение рисунков и графиков выбирают таким образом, чтобы плакаты читались слушателями со своих мест в зале.

Основная часть. Как сама диссертация, согласно нормативным документам ВАК, имеет каноническую структуру¹, так и доклад соискателя в своих фрагментах копирует эту структуру с обязательной характеристикой приведенных ниже элементов.

Структурные части доклада соискателя при защите диссертации следующие:

- введение в доклад;
- постановка цели;
- научная задача (диссертации) и задачи исследования;
- методическая часть;
- положения, выносимые на защиту;
- дополнительные сведения;
- заключение доклада.

Введение в доклад представляет собой определение необходимости выполнения работы и совершенствования объекта исследования.

¹ Положение о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 № 190). – Минск: Высш. аттестац. комиссия Респ. Беларусь, 2022. – 42 с.

Актуальность работы – обоснование необходимости ее выполнения. В технических приложениях обычно не возникает сомнений в актуальности исследований.

Объект исследования – часть изменяющегося и развивающегося материального мира, которая познается и совершенствуется исследователем. В технических работах объектом исследования являются непрерывно изменяющиеся под влиянием времени и технического прогресса транспортные средства, технологическое оборудование, здания, сооружения, процессы, материалы, организация производства и др.

Цель диссертационного исследования – основной результат при совершенствовании объекта исследования, характеризующийся технико-экономическим показателем, высокое значение которого, уставленное наперед, необходимо достичь. Сформулированная цель исследований показывает, что объект исследования в завершённом виде обладает высоким техническим уровнем (он лучший из известных аналогов). Члены совета положительно оценивают такую цель, которая выводит объект исследования на мировой уровень, что требует от ученых Президент страны.

Цель входит в название работы² в виде освоения импортозамещающей продукции или услуг новых видов, повышения технического уровня и качества изделий, повышения производительности труда и обеспечения его безопасности, исключения аварий, защиты окружающей среды от производственной деятельности, снижения расхода производственных ресурсов и т.д. В заключение доклада весьма желательно сопоставить значения указанного ранее показателя – каким оно было до выполнения работы и каким стало в результате ее выполнения.

Научная задача (диссертации). Достижение цели диссертационного исследования предполагает постановку научной задачи, обоснование концепции ее решения и формулировку задач исследования.

Научная задача – состояние противоречий между, с одной стороны, запросами производства в знаниях, которые обеспечивают более полное удовлетворение потребностей общества силами этого производства и, с другой, недостаточным уровнем соответствующих научных знаний. При обосновании научной задачи следует показать – что выполнили предыдущие исследователи (с фамилиями и учреждениями), чего недостает, а что предстояло сделать соискателю. Решение научной задачи позволяет объяснить и предсказать те факты и явления, которые с прежних позиций невозможно было предвидеть и объяснить, а также открыть пути создания новых и совершенствования действующих технических объектов.

Концепция – алгоритм решения научной задачи. Концепция по части признаков совпадает с понятием «гипотеза», она не является обязательным структурным элементом диссертации, но ее желательно привести.

Задачи исследования. Термин «задачи исследования» существенно отличается от термина «научная задача (диссертации)». Задачи исследования определяют стадии исследовательской работы. Их назначают таким образом, чтобы их число было необходимо и достаточно для достижения цели исследования. Некоторые члены совета связывают задачи исследования с заключительными выводами диссертации. Описание решений поставленных задач определяет также содержание соответствующих глав диссертации, названия которых должны быть созвучными задачам исследования. Формулировка задач исследования основывается, в основном, на тех же принципах, что и изложение цели исследования. Однако имеются некоторые особенности:

- формулировку каждой задачи исследования начинают с глагола, при этом, в отдельных случаях, допускается использование слова «исследовать»;
- количество задач исследования коррелирует с количеством положений, выносимых на защиту, однако, чаще число задач исследования превышает число положений.

При экспертизе диссертации контролируют – полностью ли решены задачи исследования в соответствующих ее главах. Неполнота этих решений может завершиться нежелательным для соискателя общим вердиктом по всей диссертации.

Методическая часть работы содержит информацию о том, как добывалось научное знание с доказательством того, что такое знание достоверно и значимо с опорой на диалектические основы современной теории познания. Необходимо отметить, что использование приведенных автором методик должно обеспечить воспроизведение этого знания другими исследователями. Здесь устанавливают параметры оптимизации и множество определяющих их факторов, показывают соотношение теоретических и экспериментальных исследований, анализа и синтеза и других категорий теории познания. Выбор оборудования и приборов для экспериментальных исследований со статистической обработкой результатов и оценкой погрешностей должны подтвердить достоверность результатов. Оригинальные авторские методики будут по достоинству оценены членами совета.

Положения, выносимые на защиту, – главные структурные элементы диссертации, раскрытию которых посвящается основная часть доклада соискателя (примерно две трети времени). Положения, выносимые на защиту, представляют собой *единство новых, достоверных и значимых результатов* исследования. Еще В.И. Даль отмечал: «Диссертация – небольшое ученое сочинение с целью доказать одно или несколько научных положений». Соискатель раскрывает и отстаивает научные положения диссертации во время ее публичной

² Положение о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 № 190). – Минск: Высш. аттестац. комиссия Респ. Беларусь, 2022. – 42 с.

защиты перед членами совета и другими присутствующими. Опыт подсказывает, что в кандидатскую работу включают 3–5 научных положений.

Научные положения – результаты исследования, выраженные в виде четких формулировок, показывающих вклад соискателя в теорию и практику. Они констатируют новые сведения о предмете исследования и указывают возможные пути и способы их использования при совершенствовании объекта исследования.

Формулировку каждого положения рекомендуется строить в виде четырехзвенного предложения, включающего такие его части [1]:

- название положения, относящееся к предмету и (или) объекту исследования;
- содержание (состав) положения в виде целостного множества его частей;
- отличительные признаки научной новизны, влияющие на совершенствование объекта исследования и определяющие отличия данного положения от известных научных сведений;
- значимый научный результат, обеспечивающий достигаемый за счет использования отличительных признаков положения и частично или полностью достижение поставленной цели.

Таким образом, описание научных положений, выносимых на защиту, базируется на всесторонней характеристике только объекта и предмета исследования, описание здесь других объектов и их свойств является неуместным. Должна четко прослеживаться связь между суммой полученных результатов всех положений и целью работы.

Предмет исследования – носитель (вместилище) научного знания (в паспорте специальности – это область исследования). Качество этому носителю придает научная новизна, наполняющая его и имеющая название. Предмет исследования по объему понятия, как правило, шире научной новизны. Однако, бывает так, что носитель есть, а новизны нет, т.е. объем предмета исследования не наполнен научной новизной (что очень плохо).

Предметом исследования служат: теории, законы, принципы, закономерности, зависимости, гипотезы, концепции, генезис процесса, экспериментальные методики, связи данного явления с другими явлениями, алгоритмы, программы, пределы и перспективы практического использования теории на практике, технологические процессы, новые материалы, системы практических рекомендаций, методические рекомендации и др. Чем ближе к началу перечисления находится носитель научного знания, тем он более значим. Развитие предмета исследования проявляется в новых знаниях об объекте исследования, а научную новизну составляют новые свойства, связи и отношения частей этого объекта.

Научная новизна – сведения рассматриваемого предмета исследования, отличающие его от одноименных предметов исследования. Научную новизну представляет до времени неизвестное, но опубликованное соискателем научное знание об объекте исследования. Она проявляется в выявлении и теоретическом обосновании этого знания в виде уточнении, дополнении или преобразовании. *Уточнение* конкретизирует отдельные теоретические или практические положения, *дополнение* расширяет известные положения, открывает новые грани решения научной задачи, а *преобразование* излагает принципиально новое решение научной задачи, которому нет аналогов. Естественно, цена научного знания в последнем случае самая высокая.

Соискатель в своем докладе показывает *приращение научной новизны* в работе – что нового своими исследованиями он добавляет в теорию и практику. В объем научной новизны включают только те сведения, которые способствуют достижению цели исследования при совершенствовании объекта исследования. Количественная оценка научной новизны выражается долей объема понятия научной новизны в объеме понятия соответствующего предмета исследования [2], это можно укрупнено определить числом отличительных признаков в отдельных положениях.

Таким образом, положения, выносимые на защиту, излагают с отражением сущности и новизны полученных соискателем научных результатов. При формулировке положений важно использовать количественные характеристики, оценивающие их значимость. В каждом отдельном положении отражают объект, предмет и цель (подцель) исследования, научную новизну результатов и их практическую значимость. Положения отражают решение сформулированных задач исследования, они составляют основу заключительных выводов диссертации.

Дополнительные сведения. Значимость работы повышается за счет наличия таких сведений в виде документов в приложении диссертации: актов внедрения усовершенствованных объектов в производство с указанием экономического эффекта, патентов на изобретения или полезные модели, технологических регламентов, компьютерных программ, алгоритмов, карт технического уровня и качества. Этим документам посвящают лист презентации.

Заключение доклада в виде содержания основных выводов диссертации завершает доклад. Здесь в сокращенном виде соискатель повторяет то, что приведено в разделах диссертации «Научная новизна» и «Положения, выносимые на защиту» с особенностями в виде использования новых методик исследования, промежуточных результатов, достигнутых подцелей общей цели. Приводят также рекомендации практического характера результатов диссертации. Полный текст заключения приводят на отдельном плакате презентации.

Выводы заключения вытекают только из тех сведений, которые имеются в диссертации. Первый вывод заключения, как правило, посвящен ответу на вопрос – как и за счет чего достигнута цель исследования, а последний – с каким практическим результатом и значением технико-экономического показателя она достигнута. Промежуточные выводы характеризуют научную составляющую работы.

Слова соискателя «Благодарю за внимание» означают, что доклад завершен, после чего председательствующий призовет присутствующих к началу дискуссии (вопросам соискателю) по теме диссертации.

Научная дискуссия, сопровождающая защиту диссертации, – это отстаивание соискателем фрагментов своей работы в части ее научной новизны, значимости, достоверности и полезности под градом вопросов и замечаний членов совета, экспертов, оппонентов, специалистов, приславших отзывы на автореферат диссертации, и других лиц. Дискуссия предполагает соблюдение этических норм в обстановке высокой требовательности, объективности и ответственности. Обсуждается лишь научная новизна и значимость диссертации, ее экономическая и социальная ценность, достоверность и обоснованность результатов, защищаемые положения, выводы и рекомендации, личный вклад соискателя в диссертацию³. Ответы соискателя на вопросы и замечания должны быть по существу дела, аргументированные (со ссылками на авторитетные источники и свои результаты) и логичные с демонстрацией уверенности. Члены совета позитивно оценивают ответы на вопросы и замечания конкретные, без общих фраз. Если вопрос соискателю непонятен, то его лучше предварительно уточнить.

В малозначащих деталях работы можно согласиться с замечаниями (работ без замечания не бывает). Где-то можно высказать свое мнение. В принципиальных вопросах необходимо проявлять упорство.

Следует отметить, что время на дискуссию, в т.ч. для ответов на вопросы, не регламентировано (в отличие от времени на доклад). Поэтому соискатель может использовать это для неспешного подробного раскрытия истории вопроса, возможных путей его решения, обоснования лучшего решения, раскрытия научной новизны и др. Каждая существенная подробность ответа будет замечена и оценена.

Ученую степень кандидата наук присуждает совет по защите диссертаций, однако это решение утверждает Президиум ВАК. На стадии утверждения решения совета по стенограмме его заседания оценивают качество состоявшейся научной дискуссии – ее объем с глубиной проработки научных положений.

Подготовка к дискуссии предполагает приобретение внутренней уверенности и стойкости. Уверенность – это знание и владение материалом, как самой диссертации, так и трудов предшественников, в том числе – классиков. Лучше всех (даже умудренных опытом членов совета) материал диссертации знает сам соискатель. Стойкость – способность сохранить самообладание, которая достигается психологическим тренингом [3].

Зная свою работу и ее особенности, при подготовке к ее защите соискатель может предвидеть до 80% вопросов и замечаний, которые будут сопровождать процедуру защиты и хорошо к ней подготовиться. Вопросы можно разделить на три вида: выяснение аспектов, неизвестных слушателям; уточнение непонятных моментов; стремление «загнать докладчика в угол». Следует на стадии подготовки к защите задать самому себе вопросы всех видов, в т.ч. самые каверзные, а на последние – ответить письменно.

При подготовке к защите будет не лишним запомнить имена и отчества членов совета и обращаться к ним соответствующим образом, а также изучить их труды, связанные с научным направлением диссертации для использования их в виде ссылок при ответах на вопросы. Аргументация ответа на вопрос члена совета с использованием его трудов – предпосылка получения голоса «за» этого ученого при тайном голосовании. Перед защитой своей диссертации полезно посетить другие защиты для накопления соответствующего опыта.

Заключение. Совет в конце своего заседания (после положительного итога тайного голосования) принимает заключение объемом в одну страницу, подписанное председателем и ученым секретарем совета, в котором формулирует – за что соискателю присуждена ученая степень. Основу этого заключения составляют положения, выносимые на защиту, в данной диссертации. Заключение в составе аттестационного дела поступит в ВАК. От конкретности, четкости и значимости заключения зависит решение Президиума ВАК об утверждении решения совета, принявшего положительный вердикт.

Представленный статейный материал поможет соискателю хорошо подготовиться к защите диссертации, четко построить доклад, расставить акценты и достойно выдержать научную дискуссию. Он полезен как для защиты диссертации, так и для предварительной экспертизы диссертации, выступления в оппонировавшей организации, а также для подготовки к аттестационным мероприятиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.П. Изложение положений, выносимых на защиту, в диссертации // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Пром-сть. Приклад. науки. – 2023. – № 2(48). – С. 117–119. DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-117-119

³ Положение о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий (в ред. Указа Президента Республики Беларусь от 02.06.2022 № 190). – Минск: Высш. аттестац. комиссия Респ. Беларусь, 2022. – 42 с.

2. Гегель Г.В.Ф. Наука логики / отв. ред. и автор вступ. статьи М.М. Розенталь. – М.: Мысль, 1972. – Т. 3. – Учение о понятии. – 374 с.
3. Левинсон А.Г. Открытые групповые дискуссии как метод прикладных социологических исследований // Вестн. обществ. мнения: Данные. Анализ. Дискуссии. – 2007. – Т. 92, № 6. – С. 45–53.

REFERENCES

1. Ivanov, V.P. (2023). Izlozhenie polozhenii, vynosimyykh na zashchitu, v dissertatsii [Presentation in the of Provisions Made on defense]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V, Promyshlennost'. Prikladnye nauki [Herald of Polotsk State University. Series B, Industry. Applied Science]*, 2(48), 117–119. DOI 10.52928/2070-1616-2023-48-2-117-119 (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Gegeel", G.V.F. (1972). *Nauka logiki. T. 3. Uchenie o ponyatii*. Moscow: Mysl". (In Russ.).
3. Levinson, A.G. (2007). Otkrytye gruppovye diskussii kak metod prikladnykh sotsiologicheskikh issledovaniy [Open-ended Group Discussions as a Technique of Applied Sociological Research]. *Vestnik obshchestvennogo mneniya: Dannye. Analiz. Diskussii [The Russian public opinion Herald: Data. Analysis. Discussions]*, 6(92), 45–53. (In Russ.).

Поступила 04.08.2023

REPORT AND SCIENTIFIC DISCUSSION DURING THE DISSERTATION DEFENSE

V. IVANOV

(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The material of the article contributes to the formation of a meaningful, informative and focused report of the applicant during the defense of the dissertation. The structure of the report from its mandatory elements is given. Particular attention is paid to the presentation of the provisions submitted for defense. The content of the scientific discussion with recommendations on preparation for it and the behavior of the applicant is determined.

Keywords: *dissertation, defense, report, presentation, discussion.*

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Рынкевич С.А.</i> Пути снижения нагруженности зубчатых передач со сложным движением элементов	2
<i>Патапаў У.А., Русан С.І., Сідор Л.С., Сівачэнка Л.А.</i> Агляд аналітычных метадаў кінематычнага аналізу прываднага механізма ланцужнага аграгата	8

ТРАНСПОРТ

<i>Богданович С.В., Балтрукович П.И.</i> Особенности моделирования человеческих ошибок в задачах мониторинга и управления дорожной инфраструктурой для интеграции в предиктивные системы безопасности	18
<i>Капский Д.В., Кустенко А.А., Ларин О.Н.</i> Исследование влияния светофорного регулирования на эффективность трамвайного движения	26
<i>Капский Д.В., Кустенко А.А.</i> Выявление скоростного потенциала в разрезе эффективности трамвайного движения	34
<i>Лю Юйвэй, Саражинский Д.С., Капский Д.В.</i> Разработка и применение алгоритмов гибкого регулирования для повышения качества движения МТС на регулируемых перекрестках	42
<i>Аземша С.А.</i> Расчет показателей дублируемости маршрутов и разработка направлений оптимизации работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения	53
<i>Иванов В.П., Дудан А.В., Вигерина Т.В., Пилипенко С.В., Пилипёнок И.И.</i> Повышение антифрикционных свойств пластичной смазки модифицированием микроразмерными добавками	60
<i>Khodoskin D., Davhulevich V., Morozova A.</i> Topographic Analysis of Accidents in Minsk in Terms of Road Traffic Accidents Involving Route Vehicles	66

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Иванов В.П., Булавка Ю.А., Сунцов А.В.</i> Анализ динамики несчастных случаев на производстве в Республике Беларусь	72
<i>Баранцева С.Е., Климош Ю.А., Попов Р.Ю., Татур А.И.</i> Комплексное использование полезных ископаемых Новодворского месторождения для производства искусственных пористых заполнителей	81
<i>Аннаев Г., Ермак А.А., Авраменок А.Н.</i> Закономерности изменения работы адгезии к поверхности стали раствора сульфатной присадки в базовом масле HC-4 при обработке ультразвуком в присутствии сукцинимидных присадок	88
<i>Аннаев Г.</i> Влияние обработки ультразвуком сульфатных и фенатных присадок на антикоррозионную активность и устойчивость к образованию осадка пакета присадок к смазочным маслам	93
<i>Южно Д.С.</i> Углеродный материал, полученный из нефтяного кокса и отходов полиэтилентерефталата	98
<i>Емельянова В.А., Емельянов А.М., Ермак А.А.</i> Влияние добавки нефтяного кокса и избыточного активного ила очистных сооружений на термогравиметрические характеристики гидролизного лигнина	105
<i>Азаров С.М., Дробыш А.А., Михасик Е.И., Янецкая А.С.</i> Моделирование условий ограничения усадки при формировании жесткой системы транспортных пор в процессе спекания волокон из Е-стекла	110

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

<i>Иванов В.П.</i> Доклад и научная дискуссия при защите диссертации	115
--	-----