

MIESIĘCZNIK
POŁOCKI.

Т о м I.
Р о к 1818.

№ 2(54), 2026

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



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 22.04.2026. Бумага офсетная 80 г/м². Формат 60×84¹/₈. Цифровая печать.
Усл. печ. л. 11,16. Уч.-изд. л. 13,45. Тираж экз. Заказ 185.

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 629.3

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-2-6

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ЭЛЕМЕНТОВ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ***д-р техн. наук, доц. С.А. РЫНКЕВИЧ**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;
Белорусско-Российский университет, Могилев)*

Отмечается, что в электрических транспортных средствах, т.е. электромобилях, повышенные нагрузки чаще всего возникают на узлах, которые либо работают в режимах высокого тягового усилия/торможения, либо несут ударные и тепловые воздействия, например, рекуперация. Одним из высоконагруженных элементов электрического транспортного средства (ЭТС) является его тормозная система. Это особенно характерно для режима комбинированного торможения, включающего рекуперативное и механическое торможение. Рассмотрены причины, по которым тормозная система электромобиля требует повышенного внимания. Среди них важнейшими являются интенсивные режимы эксплуатации, высокая цикличность, гибридный характер торможения, включающий рекуперативное торможение и механическое торможение, электромеханические риски, вопросы отказоустойчивости, процессы изнашивания элементов тормозов. Выделено и подробно описано шесть особенностей процессов торможения электрических транспортных средств. Рассмотрены особенности расчета тормозной системы ЭТС и ее основных элементов, приведен ряд расчетных формул для определения энергетических, тепловых и других характеристик тормозов. Приведен алгоритм, который может быть реализован средствами бортовой микроэлектроники электрического транспортного средства. Отмечено, что бортовым компьютером осуществляется проверка основных параметров. В случае если контролируемые параметры находятся в пределах допускаемых значений, на дисплее водителя выдается сообщение о работоспособности ЭТС. В противном случае требуются контрольно-диагностические работы.

Ключевые слова: *электрическое транспортное средство, тормозная система, рекуперативное торможение, фрикционное торможение, тормозной момент.*

Введение. В электрических транспортных средствах (ЭТС), т.е. электромобилях, повышенные нагрузки чаще всего возникают на узлах, которые либо работают в режимах высокого тягового усилия/торможения, либо несут ударные и тепловые воздействия (рекуперация, просадки напряжения, вибрации, частые циклы). Одним из высоконагруженных элементов ЭТС является тормозная система (особенно диски и механизмы при частичном «смешанном» торможении). Хотя рекуперативное торможение и берет на себя часть энергии, в реальных условиях эксплуатации часто используется комбинированное торможение, особенно при полной остановке и экстренном торможении. В этих ситуациях механические тормоза испытывают большие нагрузки.

Основная часть. Особое внимание к тормозной системе электромобилей обусловлено несколькими ключевыми факторами. Во-первых, это интенсивные режимы эксплуатации и высокая цикличность. В городских условиях ЭТС часто совершает маневры торможения и ускорения, что приводит к многократному использованию механических элементов тормозов (дисков, колодок, суппортов). Важно отметить, что даже при активной рекуперации, фрикционные тормоза все равно задействуются при резком замедлении, на малых скоростях или на скользкой дороге, когда эффективность рекуперации снижается. Во-вторых, это гибридный характер торможения. Рекуперация существенно влияет на работу всей тормозной системы. Специальный алгоритм управления динамически распределяет тормозной момент между электродвигателем, осуществляющим рекуперацию, и традиционными фрикционными тормозами. В то же время комбинированное торможение усложняет контроль температурных режимов и процессов изнашивания. В-третьих, основные трудности связаны с температурными режимами и возникающими из-за них нагрузками. При резком торможении электромобиля, особенно когда рекуперация ограничена (например, из-за старой или холодной батареи), фрикционные тормоза работают интенсивнее. Это может вызвать перегрев тормозных дисков, неравномерный износ, вибрацию при торможении и повышенные термические напряжения. Ограничения рекуперации, в свою очередь, зависят от множества факторов, таких как температура батареи, скорость, сцепление шин с дорогой и допустимая мощность зарядки. В такие моменты основная нагрузка ложится на тормозные колодки и диски, поэтому их способность выдерживать пиковые нагрузки критически важна. В-четвертых, необходимо учитывать электромеханические риски и вопросы отказоустойчивости. Высокая степень интеграции электроники в электромобилях (системы контроля устойчивости, распределения тормозных усилий, взаимодействия с ЭБУ) требует надежных алгоритмов. При возникновении неисправностей система должна корректно переходить в безопасный режим, например, обеспечивая необходимое тормозное уси-

лие только за счет фрикционных тормозов. В-пятых, обеспечение безопасности при экстренном торможении является первостепенной задачей. Требования к эффективности и стабильности торможения одинаково важны для всех транспортных средств. Однако для электромобилей особенно важно гарантировать работоспособность тормозной системы в моменты, когда рекуперация может быть ограничена. Фрикционные тормоза должны гарантировать предсказуемое замедление и сохранение устойчивости движения. В-шестых, это подверженность ресурса деградации вследствие износа. Неоптимальное соотношение между процессами рекуперации энергии и фрикционным торможением способно интенсифицировать износ тормозных колодок (и дисков), приводить к недостаточному прогреву рабочих поверхностей и, как следствие, снижать эффективность торможения. В связи с этим мониторинг ключевых параметров состояния (температурный режим, степень износа, функциональность суппортов, состояние рабочей жидкости и датчиков) приобретает важнейшее значение.

Рассмотрим особенности расчета тормозной системы ЭТС и ее основных элементов.

Энергия, которую тормозная система электромобиля должна поглотить на определенном отрезке пути, эквивалентна его кинетической энергии. Кинетическая энергия ЭТС, которую должны «забрать» тормоза на заданном интервале, равна

$$W_T = \frac{m_{\text{эТС}} \cdot (v_0^2 - v_k^2)}{2},$$

где $m_{\text{эТС}}$ – масса ЭТС, кг; v_0 и v_k – начальная и конечная скорости торможения, м/с. В случае полной остановки электромобиля $v_k = 0$.

Если учитывать комбинированное торможение (рекуперативное и фрикционное), энергия которого равна $W_{\text{фТ}}$, то вводят долю энергии, уходящую во фрикционные тормоза:

$$W_{\text{фТ}} = (1 - \eta_{\text{рек}}) \cdot W_T,$$

где $\eta_{\text{рек}}$ – доля энергии, утилизируемая рекуперацией. $\eta_{\text{рек}}$ принимает значения в диапазоне [0, 1].

Для электробусов значения $\eta_{\text{рек}}$ обычно принимают от 0,2 до 0,4, для легковых электромобилей – от 0,25 до 0,45 (т.е. уходящая во фрикционные тормоза доля энергии составляет 20–40% для электробусов и 25–45% для легковых электромобилей).

Важно принимать во внимание, что при достижении уровня заряда батареи в диапазоне 95–100% происходит автоматическое отключение или существенное ограничение функции рекуперативного торможения. Данная мера предосторожности направлена на предотвращение перезаряда аккумуляторных ячеек. Следовательно, в таких условиях кинетическая энергия, обычно преобразуемая в электрическую, рассеивается в виде тепловой энергии на тормозных дисках.

Тормозной момент M_T (Н·м) на колесе можно определить по формуле

$$M_T = \frac{F \cdot R_d}{z \cdot n},$$

где F – суммарная тормозная сила, Н; R_d – внешний (средний) радиус диска (для расчетов берут эффективный радиус, или радиус контакта колодок), м; z – число колес, участвующих в торможении; n – число тормозных механизмов колодка-диск на одно колесо (часто $n = 1$).

Момент M_T , который может развивать тормозной механизм, пропорционален усилию нажатия на педаль тормоза $F_{\text{пед}}$: $M_T = k_{\text{тп}} F_{\text{пед}}$. Коэффициенты пропорциональности $k_{\text{тп}}$ для тормозных механизмов передних и задних колес обычно различны, поэтому отличаются и развиваемые ими моменты.

Для определения тормозной силы F можно воспользоваться выражением

$$F = m_{\text{эТС}} \cdot a_T,$$

где a_T – значение среднего замедления, м/с².

Для электробуса значения среднего замедления a_T составляют 1,0–1,5 м/с², что соответствует комфортному городскому движению. Для более жесткого торможения (например, приближение к остановке «по требованию») значение a_T можно принимать до 2,0 м/с².

Для легкового электромобиля значения среднего замедления a_T составляют 1,2–1,8 м/с² (комфортный режим) и до 2,5 м/с² для экстренного торможения.

Тормозная сила, действующая на колесо:

$$F_k = \frac{F}{z}.$$

Рассмотрим особенности механики прижимания тормозных колодок в ЭТС. Сила трения $F_{\text{тр}}$ на колесе определяется по выражению

$$F_{\text{тр}} = k_{\text{тр}} \cdot N,$$

где N – суммарная нормальная сила прижимания (на комплект колодок одного колеса), Н; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения колодка–диск при данных условиях. Он зависит от типа накладок и режима (температура, влажность, наличие грязи, скорость скольжения).

Для сухого и прогретого диска фрикционных тормозов $k_{\text{тр}} = 0,35–0,45$. В случае холодных тормозов (первое торможение) $k_{\text{тр}} = 0,20–0,35$. В случае мокрого диска (дождь, вода на поверхности) $k_{\text{тр}} = 0,15–0,25$. При наличии грязи и пыли на диске (частично нарушен контакт) $k_{\text{тр}} = 0,20–0,30$. В случае перегрева фрикционных элементов тормозов значение коэффициента трения можно принимать из интервала $0,30–0,40$.

Следует отметить, что для оценки требуемого тормозного момента целесообразно использовать худшие условия эксплуатации тормозов (влага, непрогретость).

Среднее давление p в зоне контакта рассчитывается как

$$p = \frac{N}{A},$$

где A – площадь контакта.

Площадь контакта A можно приблизительно определить по формуле

$$A \approx b \cdot l$$

где b – ширина колодки; l – длина рабочей зоны по радиусу.

Обычно для тормозных колодок проверяют: прочность материала колодки на сжатие/сдвиг, прочность крепления накладки, износ по линейной модели. В учебных или проектных расчетах распространена модель износа по работе трения, а напряжения оценивают через p и допускаемые значения.

Важно подчеркнуть, что в реальных условиях эксплуатации тормозная колодка ЭТС подвергается воздействию следующих факторов: значительных контактных напряжений, неравномерного распределения давления при контакте, локальных участков с повышенной температурой, а также градиентов физико-механических свойств, обусловленных наличием текстуры и пористости материала.

При анализе тепловой нагрузки диска, ключевыми аспектами являются температурные поля и возникающие в результате термонапряжения. При этом средняя энергия, диссипирующая в процессе торможения в зоне фрикционного контакта, будет равна $W_{\text{фТ}}$.

Доля энергии W_d , уходящая в диск (а не в колодку):

$$W_d = k \cdot W_{\text{фТ}},$$

где k – доля тепла, попадающая в диск (остальное в колодки/потери), обычно принимают k от 0,2 до 0,7, что зависит от материалов и конструкции.

Энергия, приходящаяся на один диск (одно колесо), равна

$$W_{d1} = \frac{W_d}{z}$$

Для упрощенного определения увеличения средней температуры диска можно пренебречь факторами теплоотдачи в процессе торможения и неоднородностью температурного распределения по его толщине. Тогда увеличение средней температуры диска можно определить как

$$\Delta T_d = \frac{W_{d1}}{m_d c_d},$$

где m_d – масса одного диска, кг; c_d – теплоемкость материала диска (колодки), Дж/(кг·К).

Среднюю тепловую мощность можно оценить по следующим формулам:

$$P_{\text{фТ}} = \frac{W_{\text{фТ}}}{t},$$

$$P_{d1} = \frac{k \cdot W_{\text{фТ}}}{z \cdot t},$$

где t – время торможения.

Средняя тепловая мощность, выделяющаяся при торможении электромобиля, зависит от баланса между кинетической энергией, которую нужно погасить, и тем, какая часть этой энергии превращается в тепло, а какая – возвращается в батарею.

Напряжения (в Па) от температурного градиента можно определить упрощенно:

$$\sigma_T \approx 1,2 \cdot \alpha \cdot E \cdot \Delta T ,$$

где α – коэффициент теплового расширения, $1/^\circ\text{C}$; E – модуль упругости, Па; ΔT – разность температур между «горячей» и «холодной» сторонами тормозного диска.

На рисунке приведен алгоритм, который может быть реализован средствами бортовой микроэлектроники ЭТС. Бортовым компьютером осуществляется проверка основных параметров. Если контролируемые параметры находятся в пределах допустимых значений, то на дисплее водителя выдается сообщение о работоспособности ЭТС. В противном случае требуются контрольно-диагностические работы.

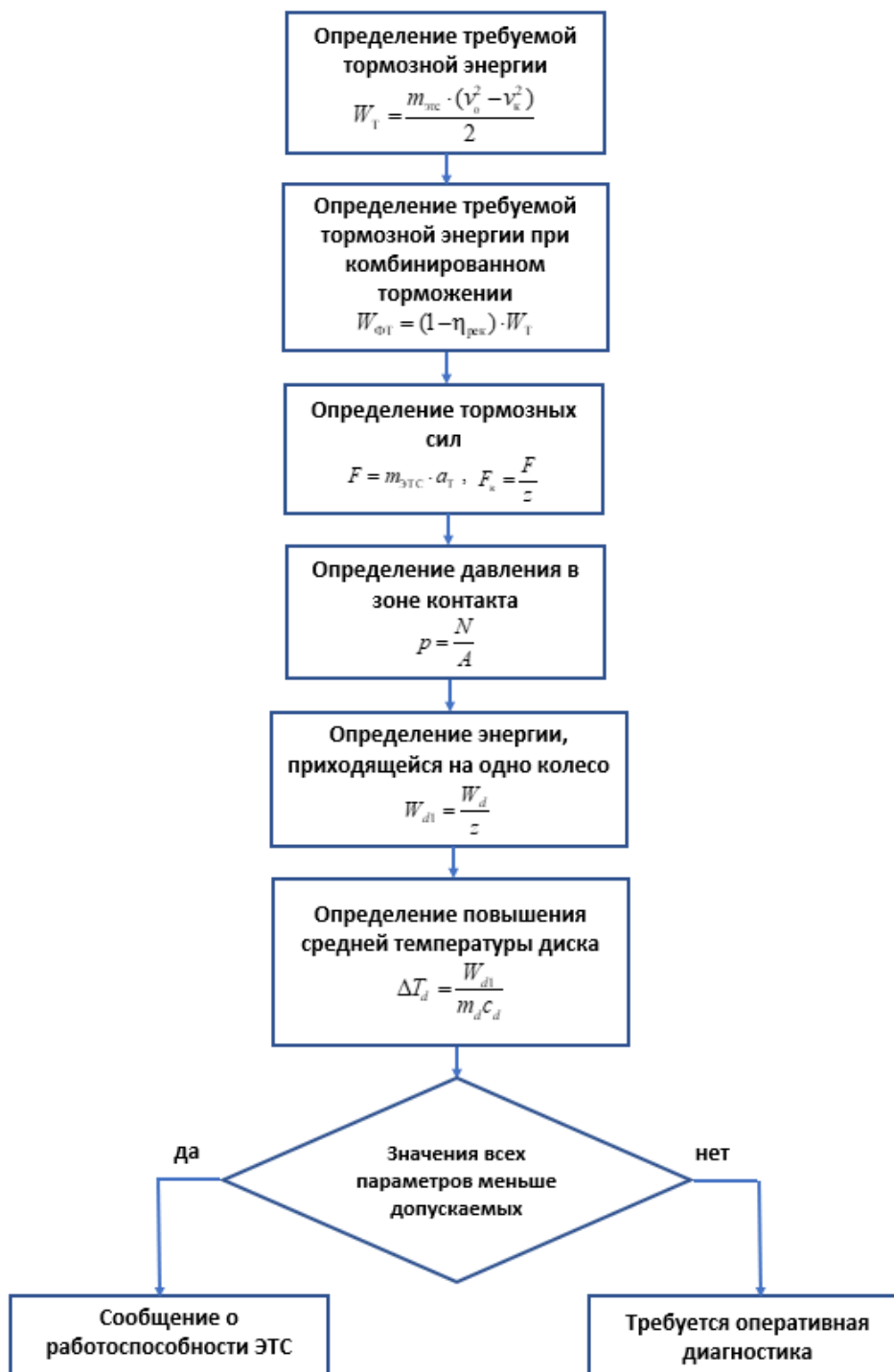


Рисунок. – Алгоритм работы системы торможения в электромобиле

Заключение. При анализе тормозной системы ЭТС следует учитывать ряд факторов, важнейшими из которых являются интенсивные режимы эксплуатации, высокая цикличность, гибридный характер торможения, включающий рекуперативное торможение и механическое торможение, погодные и климатические условия, электромеханические риски, вопросы отказоустойчивости, характер изнашивания элементов тормозов. В случае ограниченных возможностей рекуперативного торможения фрикционные тормоза должны гарантировать предсказуемое замедление и сохранение устойчивости движения. Для оценки работоспособности тормозной системы могут составляться специальные алгоритмы, который могут быть реализованы средствами бортовой микроэлектроники ЭТС.

Поступила 30.03.2026

CALCULATION FEATURES OF ELECTRIC VEHICLE BRAKING SYSTEM ELEMENTS DURING BRAKING

S. RYNKEVICH

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

It is noted that in electric vehicles, i.e., electric cars, increased loads most often occur on components that either operate in high traction/braking modes or bear impact and thermal effects, such as recuperation. One of the highly loaded components of an electric vehicle (EV) is its braking system. This is especially characteristic of the combined braking mode, which includes regenerative and mechanical braking. The reasons why the braking system of an electric vehicle requires increased attention are considered. Among the most important of these are intensive operating modes, high cyclicality, the hybrid nature of braking (including regenerative braking and mechanical braking), electromechanical risks, fault tolerance issues, and wear processes of brake components. Six features of the braking processes of electric vehicles are identified and described in detail. The article examines the calculation features of an electric vehicle's braking system and its main components, presenting a number of calculation formulas for determining the energy, thermal, and other brake characteristics. An algorithm that can be implemented using the electric vehicle's onboard microelectronics is presented. It is noted that the onboard computer checks the main parameters. If the monitored parameters are within acceptable limits, a message is displayed on the driver's display confirming the vehicle's operability. Otherwise, further testing and diagnostic work is required.

Keywords: *electric vehicle, braking system, regenerative braking, friction braking, braking torque.*

УДК 621.01+631.354.2.076

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-7-13

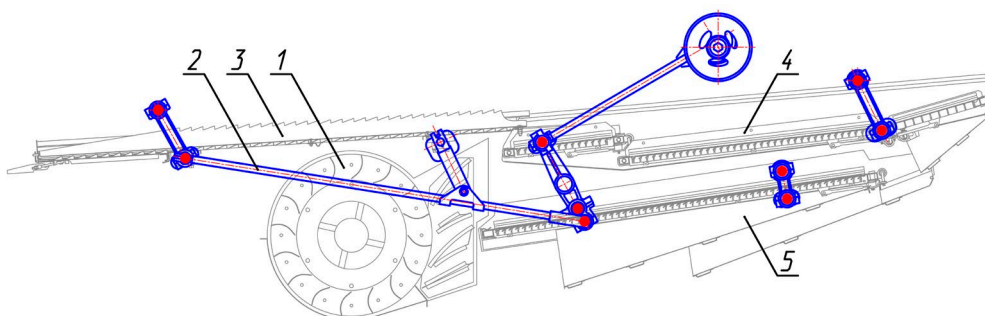
СПОСОБ ОЦЕНКИ УГЛОВ ЗАКРУЧИВАНИЯ САЙЛЕНТБЛОКОВ В МЕХАНИЗМЕ ПРИВОДА ОЧИСТКИ ЗЕРНОУБОРОЧНОГО КОМБАЙНА

А.В. КОТОВ^{1,2},ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7247-043X>канд. физ.-мат. наук, доц. Д.Г. КРОЛЬ²ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8385-2492>¹(ОАО «Сейсмотехника», Гомель)²(Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого)

Представлен способ оценки углов закручивания сайлентблоков в механизме привода очистки зерноуборочного комбайна на этапе его математического моделирования. Изложен новый аналитический способ оценки деформационной нагруженности сайлентблоков, основанный на применении теории комплексных чисел в кинематическом анализе механизма очистки. Данный способ позволяет через аргумент вектора комплексного числа получать функциональные зависимости углов закручивания сайлентблоков для шарниров механизма привода очистки в зависимости от обобщенной координаты. Разработан простой и эффективный алгоритм для расчета итогового коэффициента использования допустимого угла закручивания сайлентблока, который позволяет наглядно оценивать соответствие выбранных сайлентблоков кинематическим требованиям на стадии проектирования, что исключает их неправильный подбор.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, система очистки, механизм привода, сайлентблок, угол закручивания, кинематический анализ, теория комплексных чисел, математическое моделирование.

Введение. Очистка зерна – один из важнейших этапов работы зерноуборочного комбайна (ЗУК), в процессе которого под действием вентилятора и вибрации происходит завершающее выделение зерна из зернового вороха, недомолоченных колосьев и др. примесей. Функциональная эффективность всей системы в значительной степени зависит от механизма привода очистки, чья кинематика определяет характер колебательного движения всех рабочих звеньев и связанных с ними решет. Достаточно высокая частота колебаний звеньев в сочетании со значительными массово-инерционными характеристиками решет (включая технологическую массу убираемой культуры) позволяет отнести данный механизм к ключевым источникам динамической нагрузки на раму ЗУК. Для снижения указанной динамической нагрузки в шарнирах механизма привода очистки традиционно используются сайлентблоки (упругие шарниры). Данные элементы представляют собой резинометаллические (иногда с полиуретановой вставкой) шарниры, которые за счет эластичности упругого элемента выполняют функцию демпфирования колебаний, а также обеспечивают подвижность соединяемых звеньев, но в достаточно ограниченном диапазоне угла закручивания. На рисунке 1 приведена система очистки ЗУК с выделенными местами установки сайлентблоков в механизме привода очистки.



1 – вентилятор; 2 – механизм привода очистки; 3 – стрясная доска; 4 – верхний решетный стан;
5 – нижний решетный стан

Рисунок 1. – Система очистки зерноуборочного комбайна

Ресурс сайлентблоков во многом определяется их правильным выбором по допускаемому углу закручивания, а также действующей максимальной радиальной нагрузке. Количественная оценка указанных характеристик сайлентблоков на сегодня в условиях эксплуатации достаточно затруднена. Поэтому на практике данные параметры рассчитываются на стадии предварительного проектирования на соответствующих математических или виртуальных моделях.

Несмотря на большое разнообразие конструкций систем очистки ЗУК, в т.ч. кинематических схем механизма привода, моделирование данных систем достаточно полно представлено в научной литературе. Известны работы, связанные с исследованием кинематики механизма привода очистки [1–3], с расчетом его силовой нагруженности [2; 4], с решением задачи уравнивания¹ [5; 6], с моделированием движения воздушной и технологической массы [7–9], а также с виртуальными испытаниями в программном комплексе динамического анализа систем твердых тел [10]. Однако вопросу методики расчета углов закручивания сайлентблоков с помощью данных моделей до сих пор не уделялось должного внимания [11].

Некорректный подбор сайлентблока приводит к постепенным сбоям в работе механизма привода очистки, росту динамических нагрузок и, как следствие, простоев техники, что недопустимо в условиях жестких сроков проведения уборочной кампании. В связи с этим оперативная оценка рабочих параметров сайлентблоков (в первую очередь углов закручивания) на этапе математического моделирования механизма привода очистки ЗУК представляет собой актуальную научно-практическую задачу. Ее решение позволит своевременно, еще на стадии проектирования, скорректировать кинематическую схему для оптимизации характеристик узла и предотвратить возможные эксплуатационные сбои в работе системы очистки.

Цель и постановка задачи. Предложить способ оперативной оценки углов закручивания сайлентблоков в механизме привода очистки ЗУК. Предлагаемый подход позволяет еще на этапе предварительного проектирования и виртуальных испытаний количественно оценить деформационную нагруженность сайлентблоков, что является необходимым условием для обеспечения их надежности, а также устойчивого протекания всего технологического процесса очистки. Для достижения указанной цели была разработана соответствующая математическая модель механизма привода очистки ЗУК, предложены аналитические зависимости и алгоритм для количественной оценки допустимых значений углов закручивания сайлентблоков с помощью соответствующего коэффициента.

Материалы и методы. При разработке математической модели механизма привода очистки использовался метод преобразования координаты в неизменном базисе с применением теории комплексных чисел. Основные параметры углов закручивания сайлентблоков механизма были рассчитаны через аргумент вектора комплексного числа.

Основная часть. В качестве объекта исследования был выбран механизм привода очистки ЗУК КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS12» производства ОАО «Гомсельмаш». Данный механизм представляет собой пространственную конструкцию, симметричную относительно своей продольной плоскости, который с рядом допущений может быть сведен к плоской расчетной схеме, кинематическая схема которой приведена на рисунке 2. В качестве ведущего звена выступает кривошип AB , который через шатун BC приводит в колебательное движение все оставшиеся звенья механизма. К звеньям механизма привода очистки крепятся стрясная доска и решетка (не показаны на рисунке 2), которые колеблются в противофазе для перемещения и очистки поступающей технологической массы.

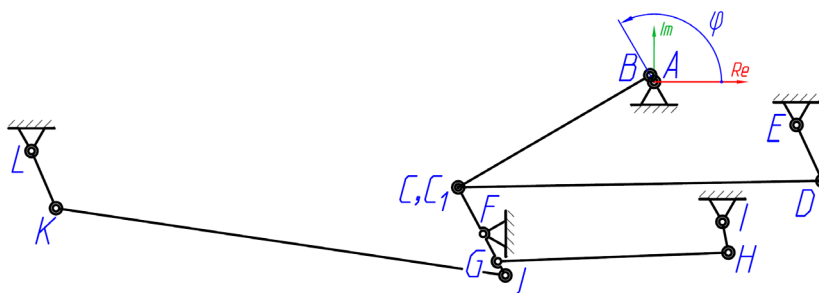


Рисунок 2. – Кинематическая схема механизма привода очистки зерноуборочного комбайна

При разработке математической модели рассматриваемого механизма привода очистки ЗУК был использован метод преобразования координат в неизменном базисе с применением теории комплексных чисел [12; 13], а аналитическое описание кинематики проводилось в последовательности, изложенной в работе [1]. Использование аппарата теории комплексных чисел в кинематическом анализе механизма привода очистки ЗУК было выбрано неслучайно, т.к. по сравнению с классическими методами данный метод обладает рядом существенных преимуществ: минимальное числа аналитических выражений, применение только элементарных операций сложения, вычитания и умножения, а также быстрый доступ к угловым параметрам звеньев механизма. Все это позволило элегантно описать кинематику рассматриваемого рычажного механизма.

¹ Мартыненко Д.С. Повышение эффективности системы очистки зерноуборочного комбайна путем применения рекуперативного привода решет и транспортной доски: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Мартыненко Дмитрий Сергеевич. – Тюмень, 2015. – 170 л.

Рассматриваемый механизм обладает одной степенью свободы, поэтому положение всех его характерных точек однозначно определяется углом φ поворота входного звена – кривошипа AB относительно действительной оси комплексной плоскости. Этот угол принят в качестве обобщенной координаты. При построении математической модели начало системы координат комплексной плоскости (Re, Im – соответственно глобальная ось абсцисс и ординат) разместим в неподвижной опоре A , а в качестве входных параметров примем координаты неподвижных опор и размеры звеньев.

В результате математического моделирования была описана кинематика рассматриваемого механизма привода очистки ЗУК с помощью теории комплексных чисел и были получены радиус-векторы всех характерных точек в функции от обобщенной координаты (для обозначения вектора комплексного числа используется знак нижнего подчеркивания):

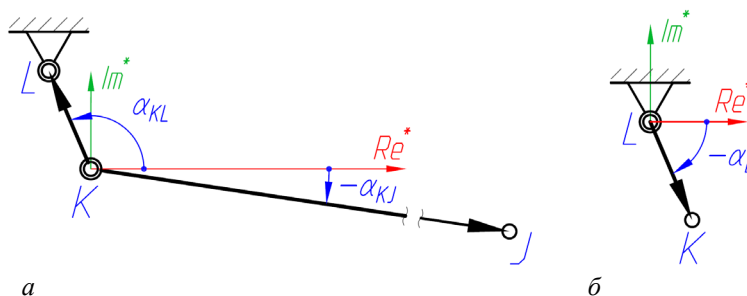
$$\underline{B}(\varphi), \underline{C}(\varphi), \underline{D}(\varphi), \underline{G}(\varphi), \underline{J}(\varphi), \underline{H}(\varphi), \underline{K}(\varphi)$$

Как показали результаты исследования [13], математические модели плоских рычажных механизмов, построенные с помощью математического аппарата комплексных чисел, позволяют достаточно эффективно находить все угловые характеристики звеньев (угол наклона, аналого угловой скорости и ускорения) через аргумент комплексного числа, что в общем виде можно выразить как

$$\alpha_i(\varphi) = \arg(\underline{r}_i(\varphi)); \quad \omega_{qi}(\varphi) = \frac{d}{d\varphi} \arg(\underline{r}_i(\varphi)); \quad \varepsilon_{qi}(\varphi) = \frac{d^2}{d\varphi^2} \arg(\underline{r}_i(\varphi)),$$

где \underline{r}_i – радиус-вектор i -го звена рычажного механизма, представленный в виде комплексного числа.

Опираясь на это свойство, покажем способ оперативной оценки величины углов закручивания сайлентблоков в шарнирах звеньев (например, в т. K) и шарнирах опор (например, в т. L) механизма привода очистки ЗУК, используя расчетные схемы, приведенные на рисунке 3.



***a* – сайлентблок в шарнире звеньев; *б* – сайлентблок в шарнире опоры**

Рисунок 3. – Расчетные схемы к оценке угла закручивания сайлентблоков в шарнирах

Первым рассмотрим сайлентблок в шарнире, соединяющим звенья KL и KJ . Углы наклона данных звеньев к действительной оси локальной системы координат комплексной плоскости (Re^*, Im^* – соответственно локальная ось абсцисс и ординат) найдем как (см. рисунок 3, *a*):

$$\alpha_{KL}(\varphi) = \arg(\underline{KL}(\varphi)); \quad \alpha_{KJ}(\varphi) = \arg(\underline{KJ}(\varphi)),$$

где \underline{KL} и \underline{KJ} – направляющие векторы соответствующих звеньев, представленные в виде комплексных чисел.

Разность полученных углов по модулю даст функцию изменения угла закручивания сайлентблока в шарнире K в зависимости от изменения обобщенной координаты:

$$\alpha_K(\varphi) = |\alpha_{KL}(\varphi) - \alpha_{KJ}(\varphi)| \tag{1}$$

Рассчитываемый через аргумент вектора комплексного числа угол наклона звена может быть положительным или отрицательным в зависимости от того, в каком направлении относительно действительной оси комплексной плоскости он отсчитывается. Если угол поворота отсчитывается против движения часовой стрелки (см. рисунок 3), то угол будет принимать положительное значение, а если по часовой – отрицательное. Данное обстоятельство объясняет наличие знака разности в выражении (1), а использование модуля позволяет учесть свойство коммутативности для вычисляемых угловых величин.

График функции (1) представляет собой синусоиду (рисунок 4, *a*), имеющую смещение по фазе и два экстремума, соответствующие двум крайним положениям ведущего звена (кривошипа), которые ограничивают максимальные углы закручивания сайлентблоков. Важным параметром, влияющим на долговечность сайлент-

блоков, является скорость их закручивания. На рисунке 4, б представлена графическая зависимость аналога угловой скорости угла закручивания от обобщенной координаты $\omega_{qK}(\varphi)$:

$$\omega_{qK}(\varphi) = \frac{d}{d\varphi} \alpha_K(\varphi). \quad (2)$$

Приравняв нулю выражение (2) и решив численно полученное уравнение (например, с помощью математического пакета PTC MathCAD), можно найти углы поворота кривошипа для двух крайних положений:

$$\{\omega_{qK}(\varphi) = 0, \varphi_i \in [0; 2\pi]\} = \varphi_{\min}, \varphi_{\max}.$$

Используя найденные значения, найдем минимальное и максимальное значение угла закручивания сайлентблока в шарнире K :

$$\alpha_K^{\min} = \alpha_K(\varphi_{\min}); \quad \alpha_K^{\max} = \alpha_K(\varphi_{\max}).$$

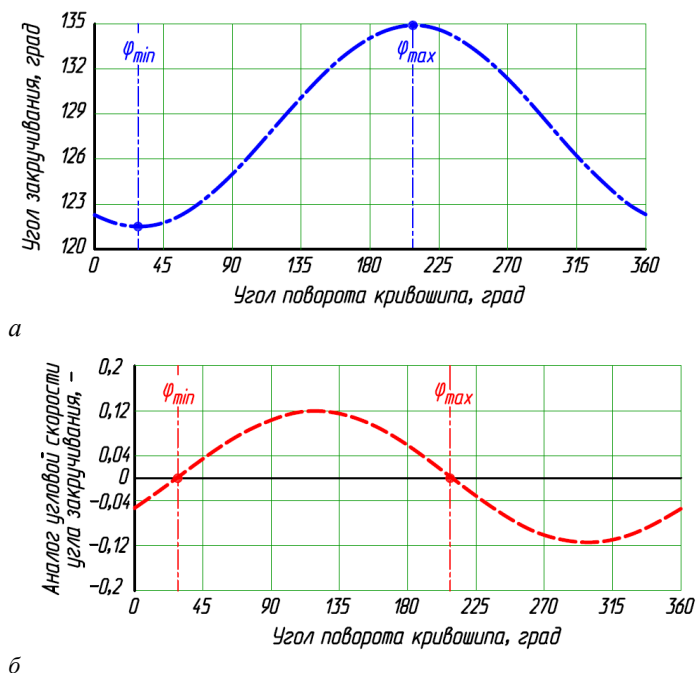
Дополнительные параметры угла закручивания сайлентблока, такие как размах, амплитуда и среднее значение, можно рассчитать как

$$\alpha_K^r = \alpha_K^{\max} - \alpha_K^{\min}; \quad \alpha_K^a = 0,5\alpha_K^r; \quad \alpha_K^m = \alpha_K^{\min} + \alpha_K^a.$$

Окончательно оценить угол закручивания сайлентблока удобно с помощью итогового коэффициента использования допустимого угла закручивания:

$$k_\alpha^K(\varphi) = \frac{|\alpha_K(\varphi) - \alpha_K^m|}{[\alpha]} \leq 1, \quad (3)$$

где $[\alpha]$ – допустимый угол закручивания для предварительно выбранного типоразмера сайлентблока согласно справочным данным, рад.



a – угол закручивания; b – аналог угловой скорости угла закручивания

Рисунок 4. – График изменения угловых параметров для сайлентблока в шарнире K механизма

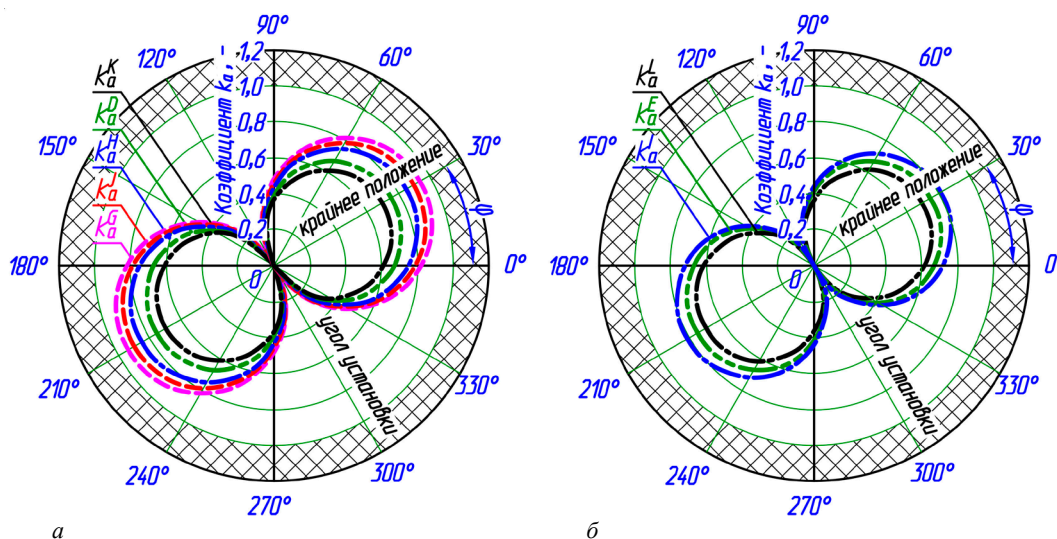
Выражение (3) позволяет наглядно проводить графическую оценку углов закручивания всех сайлентблоков механизма привода очистки на одном графике (годографе). Если коэффициент угла закручивания не превышает значение, равное 1, то подобранный сайлентблок удовлетворяет условию обеспечения требуемого угла закручивания. Если значение превышает 1, то необходимо выбрать следующий типоразмер сайлентблока или внести изменения в кинематическую схему механизма привода очистки для ужесточения углов закручивания в анализируемом шарнире.

По аналогии с вышеприведенными выражениями можно рассчитать угол закручивания в шарнире L опоры (см. рисунок 3, б). В этом случае функцию угла закручивания сайлентблока в шарнире рассчитывается сразу, без использования выражения (1):

$$\alpha_L(\varphi) = \arg(LK(\varphi))$$

Дальнейший порядок действий будет аналогичен расчету для угла закручивания сайлентблока в шарнире K , соединяющего два звена, и не будет приводиться в данной работе.

Годографы изменения углов закручивания сайлентблоков в шарнирах звеньев механизма привода очистки ЗУК КЗС-1218 «ПАЛЕССЕ GS12» приведены на рисунке 5, а, а в шарнирах опор – на рисунке 5, б.



а – результаты расчета в шарнирах звеньев; б – результаты расчета в шарнирах опор

Рисунок 5. – Годографы изменения коэффициента угла закручивания сайлентблоков в шарнирах механизма привода очистки

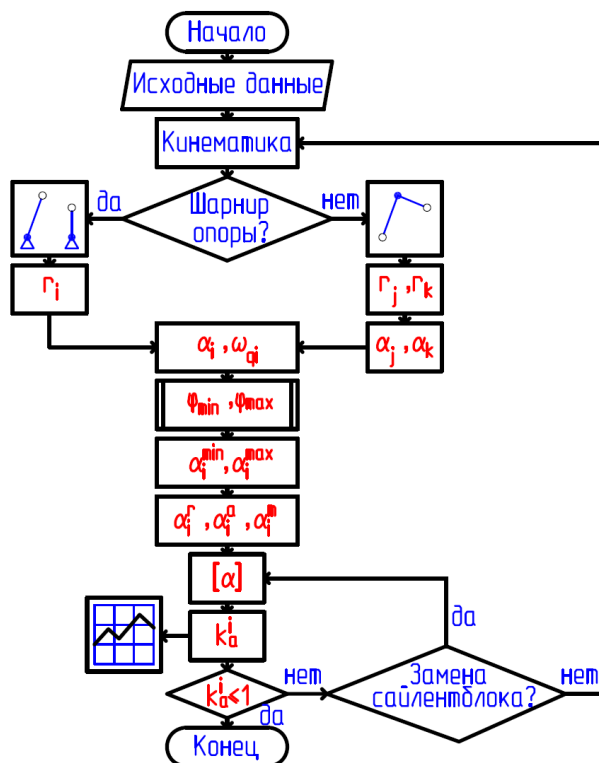


Рисунок 6. – Блок-схема алгоритма для оценки углов закручивания в сайлентблоке

Как видно из результатов приведенного расчета во всех шарнирах механизма привода очистки ЗУК, коэффициент использования допустимого угла закручивания сайлентблоков не превышает значения 1 (находится внутри незаштрихованной области) при допустимом значении угла закручивания выбранного сайлентблока $[\alpha] = 9,5^\circ$. Стоит также отметить, что полученные графики изменения коэффициента угла закручивания являются симметричными относительно прямой, расположенной под углом, который соответствует углу установки сайлентблоков в механизме (см. рисунок 5). Данная прямая линия расположена перпендикулярно прямой, проходящей через максимальные значения углов закручивания в крайних положениях механизма привода очистки.

Вышеописанный алгоритм аналитической оценки углов закручивания сайлентблоков механизма привода очистки можно представить в виде блок-схемы (см. рисунок 6).

Представленный выше способ требует дополнительной доработки, если на кинематической схеме механизма наблюдаем совпадение вращательных кинематических пар (шарниров), например C и C_1 (см. рисунок 2). Тогда необходимо ввести базисное звено, по отношению к которому будем определять действительные углы закручивания. Для нашего случая можно принять за такое звено CF . Тогда в шарнире C будем определять угол закручивания звена CD относительно звена CF , а в шарнире C_1 – угол закручивания звена C_1B относительно звена CF .

Заключение. Предложенный способ позволил аналитически провести оперативную количественную оценку углов закручивания сайлентблоков механизма привода очистки с помощью математического аппарата теории комплексных чисел через аргумент вектора комплексного числа. Способ является универсальным, не зависит от кинематической схемы механизма привода очистки и может быть успешно применен к любым плоским рычажным механизмам, требующим соответствующей оценки углов закручивания в шарнирах. Реализация предложенного алгоритма расчета в соответствии с блок-схемой не представляет особой сложности для современных математических пакетов, способных оперировать с комплексными числами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов А.В., Чупрынин Ю.В. Применение векторного анализа для оптимизации механизма привода системы очистки зерна зерноуборочного комбайна при его проектировании // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2009. – № 2(7). – С. 43–48.
2. Кинематический и силовой анализ двухстанной очистки зерноуборочного комбайна / Д.А. Дубовик, В.И. Прибыльский, А.А. Новиков // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2019. – № 6. – С. 78–90. DOI: 10.1134/S023571191906004X
3. Mathematical modeling and research of the work of the grain combine harvester cleaning system / I. Badretdinov, S. Mudarisov, R. Lukmanov et al. // *Computers and Electronics in Agriculture*. – 2019 – № 165 – P. 104966. DOI: 10.1016/j.compag.2019.104966
4. Обоснование выбора силового метода снижения динамической нагруженности привода системы очистки зерноуборочного комбайна типа «ПОЛЕСЬЕ» / Л.И. Бойко, Н.Л. Ракова, Т.В. Бойко и др. // *Агропанорама*. – 2016. – № 5(117). – С. 9-14.
5. Климович О.В., Бойко Т.В. Экспериментальные исследования рекуперативного привода системы очистки зернового вороха комбайна // *Агропанорама*. – 2011. – № 6(88). – С. 11–14.
6. Бойко Л.И. *Механика приводов колеблющихся рабочих органов машин*. – Минск: Мэджик Бук, 2003. – 240 с.
7. Калиновский А.А. Расчетная оценка влияния движения решет на аэродинамические потоки в системе очистки зерноуборочного комбайна // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2024. – № 4(69). – С. 97–104. DOI: 10.46864/1995-0470-2024-4-69-97-104
8. Сороченко С.Ф. Система очистки зерноуборочного комбайна для работы на склонах. – Барнаул: АлтГТУ, 2023. – 148 с.
9. Zhao Z., Yang X., Zhang G. Analysis and optimization test of operation process of cleaning device of corn seed harvester. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 2022. – P. 211–220. DOI: 10.35633/inmateh-68-21
10. Котов А.В., Чупрынин Ю.В., Дюжев А.А. Проектирование и исследование механизма очистки зерноуборочного комбайна при помощи пакета ADAMS // *Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: доклады Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию со дня рождения д.т.н., проф. В.А. Скотникова / Минск (11–14 февр.) 2009 г. / редкол.: А. В. Кузьмицкий и др. – Минск: БГАТУ, 2009. – С. 165–171.*
11. Анализ кинематики механизма системы очистки роторного зерноуборочного комбайна / Д.В. Джасов, О.В. Прядко, Н.В. Иноземцева // *Инновационные технологии в агропромышленном комплексе – сегодня и завтра: сб. науч. ст. 7-й междунар. науч.-практич. конф.: в 2 ч. / Гомель (17 нояб. 2023 г.) / НТЦК ОАО «Гомсельмаш»*. – Гомель, 2023. – С. 74–79.
12. Котов А.В., Кроль Д.Г. Кинематический и силовой анализ механизма подъема наклонной камеры зерноуборочного комбайна с применением теории комплексных чисел // *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ*. – 2025. – № 1(24). – С. 40–48.
13. Котов А.В., Кроль Д.Г. Способ и программная реализация кинематического анализа кулисного механизма // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2025. – № 4(73). – С. 25–30. DOI: 10.46864/1995-0470-2025-4-73-25-30

14. Баран И.А., Попов В.Б. К вопросу о повышении производительности системы очистки самоходного зерноуборочного комбайна // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2023. – № 1(92). – С. 20-30.

Поступила 09.02.2026

METHOD FOR ESTIMATION OF TORSION ANGLES OF SILENT BLOCKS IN THE CLEANING DRIVE MECHANISM OF A GRAIN HARVESTER

A. KOTOV^{1,2}, D. KROL²

¹(JSC Seismotekhnika, Gomel)

²(Sukhoi State Technical University of Gomel)

A method for estimating silent block torsion angles in a combine harvester's cleaning drive mechanism during its mathematical modeling is presented. This paper presents a new analytical approach for assessing the deformation load of silent blocks, based on the application of complex number theory to the kinematic analysis of the cleaning mechanism. This method allows one to obtain functional dependencies for silent block torsion angles for the cleaning drive mechanism hinges, depending on a generalized coordinate, using the argument of a complex number vector. A simple and effective algorithm for calculating the final utilization factor for the permissible silent block torsion angle has been developed. This algorithm allows for a visual assessment of the compliance of selected silent blocks with kinematic requirements at the design stage, thereby eliminating incorrect selection.

Keywords: grain harvester, cleaning system, drive mechanism, silent block, twist angle, kinematic analysis, complex number theory, mathematical modeling.

ТРАНСПОРТ

УДК 625.739:656.05

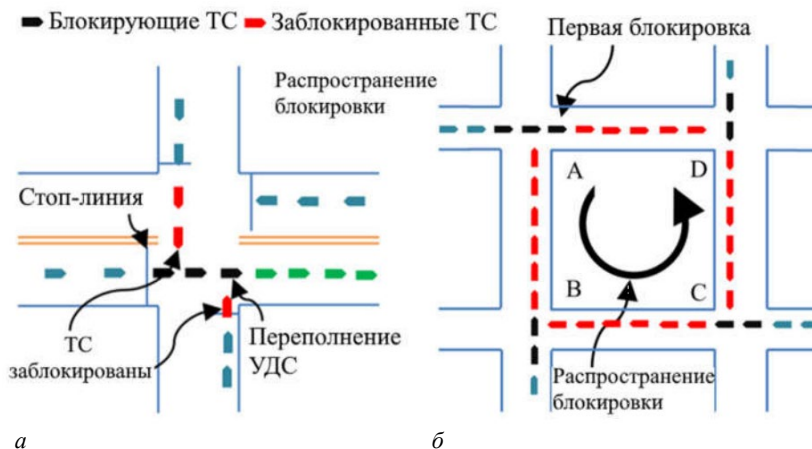
DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-14-19

РАЗРАБОТКА И ОЦЕНКА АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА
ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ БЛОКИРОВОК ТРАНСПОРТНОГО УЗЛАЕ.Я. ХАСИНЕВИЧ¹, д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ², А.В. КОРЖОВА³,
Г.М. КУХАРЕНКО¹, Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ³¹Белорусский национальный технический университет, Минск;²Полоцкий государственный университет имени Ефросинии Полоцкой;³Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск)

Одна из острых проблем современных городов – блокировка движения на перекрестках, вызванная переполнением прилегающих участков уличной сети очередями. Такая ситуация приводит к каскадному распространению заторов, значительному увеличению транспортных задержек и экономическим потерям. Целью исследования является разработка мероприятий и адаптивного алгоритма управления светофорными сигналами для предотвращения блокировок на примере сложного транспортного узла в г. Минске – пересечения улицы Притыцкого и проспекта Пушкина. Проблема данного узла идентифицирована как регулярное возникновение «стоп-волн», распространяющихся от одного перекрестка к другому и приводящих к невозможности освободить перекресток за время действия разрешающего сигнала светофора. Предложен комплексный подход, включающий изменение плана координации для смежных перекрестков, введение специальной дополнительной фазы для разблокирования перекрестка и разработку алгоритма ее адаптивного включения. Алгоритм основан на использовании данных от детекторов транспорта, установленных на определенном расстоянии от перекрестка для заблаговременного обнаружения «стоп-волны». Оценка эффективности предложенных решений выполнена методом имитационного моделирования в среде SUMO. Внедрение адаптивного управления сокращает транспортные задержки на 30%.

Ключевые слова: блокировка перекрестка, «стоп-волна», адаптивное управление, светофорное регулирование, имитационное моделирование, эффективность, организация дорожного движения.

Введение. Проблема дорожных заторов в условиях постоянно растущей автомобилизации и урбанизации является одной из ключевых для устойчивого развития мегаполисов [1]. Особую остроту приобретают непредсказуемые и масштабные заторовые ситуации, возникающие не столько из-за суточных пиковых нагрузок, а вследствие блокировки движения на ключевых, высоконагруженных перекрестках [2; 3]. Это явление, снижающее качество дорожного движения и эффективность транспортной системы города в целом, известное как «gridlock», характеризуется состоянием взаимоблокировки (рисунок 1), когда очереди транспортных средств (ТС) с одного перекрестка «запирают» движение на смежном, что приводит к полной остановке движения в нескольких направлениях и быстрому распространению затора по сети [4–7].



а – блокировка движения на перекрестке; б – gridlock-эффект

Рисунок 1. – Схемы блокировки движения

Механизм возникновения такой блокировки зачастую связан с феноменом «стоп-волны» – распространением волны торможения в плотном транспортном потоке в направлении, обратном движению. В городских условиях «стоп-волны» часто возникают из-за недостаточной пропускной способности перекрестков, когда очередь, оставшаяся от предыдущего цикла светофорного регулирования, не успевает рассосаться до прихода следующей группы автомобилей, движущейся в режиме координированного управления («зеленая волна»). В результате прибывающие ТС вынуждены тормозить, формируя плотную очередь, которая распространяется назад и может достигнуть предыдущего по ходу движения перекрестка, физически блокируя его.

Данная проблема весьма актуальна для г. Минска, в частности, для транспортного узла на пересечении ул. Притыцкого и проспекта Пушкина (рисунок 2). Этот узел является одним из самых загруженных в городе и регулярно испытывает блокировки в вечерний час пик, вызванные именно эффектом «стоп-волны» на перегоне между ул. Сердича и пр-том Пушкина.

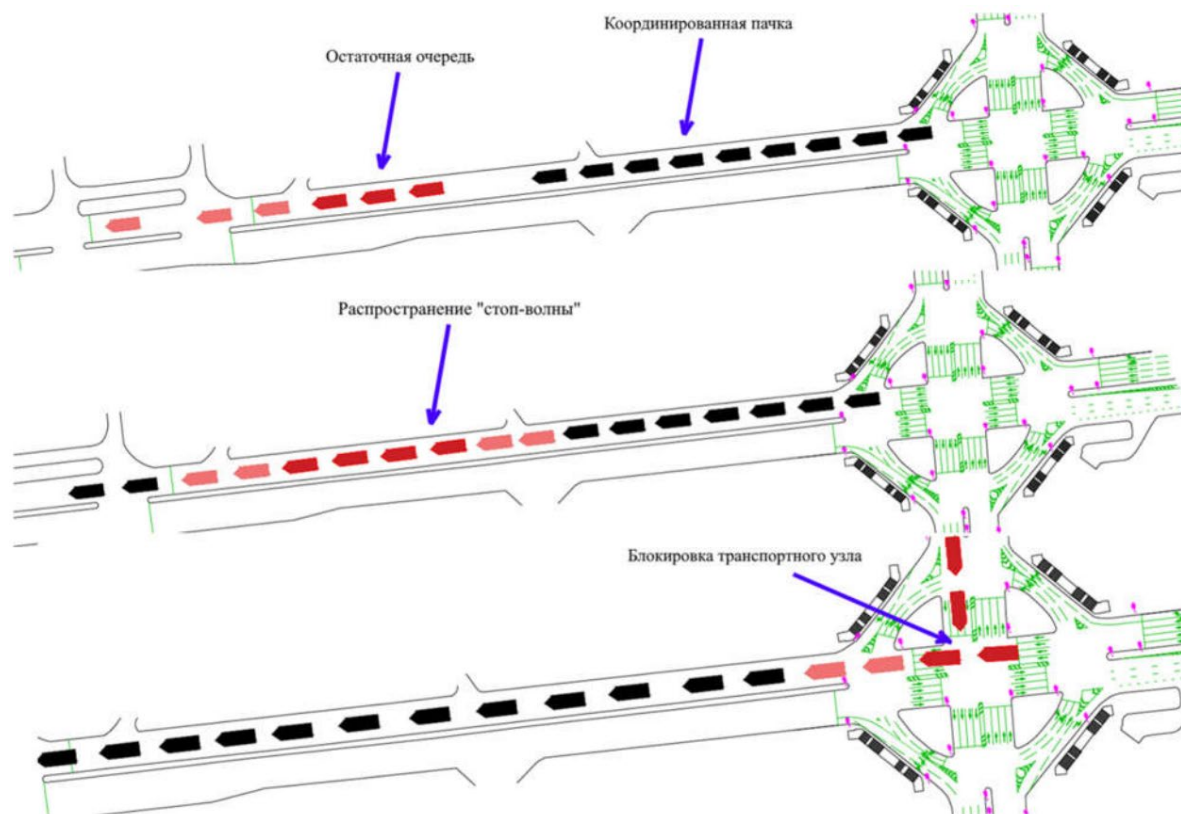


Рисунок 2. – Процесс блокировки транспортного узла

Традиционные методы управления, основанные на жестких программах координации, оказываются неэффективными. Решение проблемы требует внедрения интеллектуальных транспортных систем (ИТС), способных адаптироваться к текущей дорожной обстановке. Современные стратегии предотвращения блокировок базируются на принципах ограничения въезда на переполненный участок или, наоборот, принудительного освобождения блокируемого перекрестка.

Целью работы является создание и оценка эффективности алгоритма адаптивного управления, который позволяет заблаговременно идентифицировать угрозу блокировки и активировать специальные меры для ее предотвращения, минимизируя при этом негативное влияние на общую эффективность дорожного движения.

Основная часть. *Характеристика объекта и анализ проблемы.* Исследуемый транспортный узел включает пересечение ул. Притыцкого с пр-том Пушкина, а также прилегающие регулируемые пересечения и перегоны (с улиц Матусевича, Одоевского, Жудро, Сердича, Берута, Ольшевского). Движение по обоим магистралям осуществляется в режиме координированного управления, однако в вечерний час пик (17:45–19:45) наблюдаются регулярные сбои в работе системы.

Натурные обследования и анализ данных показали, что ключевая проблема возникает на перегоне ул. Притыцкого при движении в сторону МКАД. После пересечения с ул. Сердича транспортный поток сталкивается с остаточной очередью на перекрестке с пр-том Пушкина. Пропускная способность этого перекрестка в данном направлении ограничена, и за время действия разрешающего сигнала не все накопившиеся автомобили успевают его проехать. В то же время прибытие группы автомобилей с перекрестка ул. Сердича приводит к резкому уплотнению потока и формированию «стоп-волны», движущейся назад со скоростью около 5 м/с. Эта

волна достигает перекрестка Притыцкого–Пушкина как раз к моменту окончания разрешающего сигнала, в результате чего несколько автомобилей остаются на перекрестке, блокируя движение по пр-ту Пушкина (см. рисунок 2).

Анализ существующих стратегий управления показал, что наиболее перспективным для текущих условий Республики Беларусь, где технологии подключенных автомобилей (Connected Vehicles, CV) еще не получили широкого распространения, является подход, основанный на данных от стационарных детекторов транспорта. Стратегии, подобные «Bang-Bang», предложенной Михалопулосом, предполагают переключение фаз при достижении очередями предельных значений, что позволяет гибко перераспределять время зеленого сигнала между конфликтующими направлениями.

Для решения идентифицированной проблемы был предложен трехэтапный подход.

Изменение координированного управления. Первым шагом стала коррекция существующего плана координации по ул. Притыцкого (рисунок 3). Исходный план не обеспечивал достаточного времени для рассеивания остаточной очереди на перекрестке с проспектом Пушкина. Путем имитационного моделирования были подобраны новые сдвиги (offsets) для светофорных объектов на пересечениях с ул. Жудро и ул. Сердича. Сдвиг на СФО «Притыцкого–Жудро» был увеличен на 23 с, а на СФО «Притыцкого–Сердича» – на 10 с. Это позволило «отодвинуть» время прибытия координированной группы автомобилей, дав очереди на проблемном перекрестке дополнительное время на уменьшение, что снизило вероятность возникновения «стоп-волны».

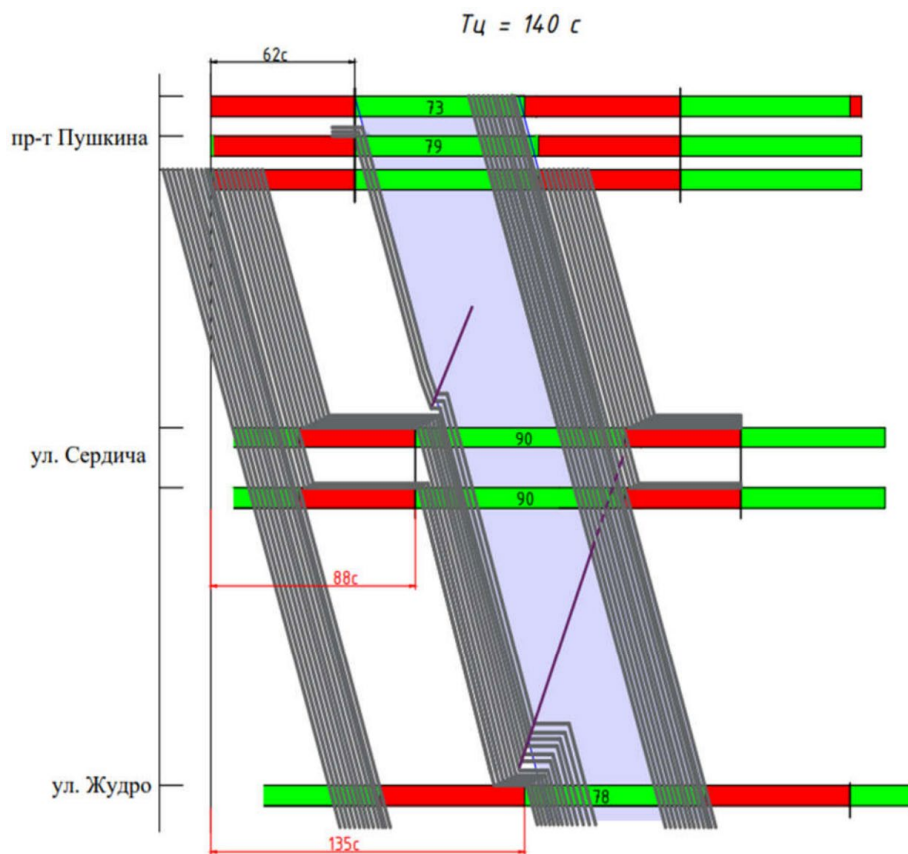


Рисунок 3. – Графическое представление предлагаемого плана координации

Использование дополнительной фазы светофорного регулирования. Поскольку изменение только координации не может полностью исключить проблему при пиковых нагрузках, следующим шагом стало введение специальной дополнительной (третьей) фазы на светофорном объекте «Притыцкого – Пушкина». Основная идея этой фазы – обеспечить принудительное освобождение перекрестка автомобилями, движущимися по ул. Притыцкого, которые попали в «стоп-волну» и рискуют остаться на перекрестке. Эта фаза включается после завершения основной фазы для движения по ул. Притыцкого и до начала движения по пр-ту Пушкина. Для ее реализации предлагается использовать направление 16 (правый поворот с ул. Притыцкого на пр-т Пушкина), разрешив ему движение на несколько секунд дольше. В качестве длительности дополнительной фазы было выбрано 10 с (1 с основной такт + 9 с промежуточный), что достаточно для освобождения перекрестка без значительного влияния на общую продолжительность цикла (140 с) и безопасность движения. Важно отметить, что аналогичная специальная фаза уже реализована на данном объекте, что подтверждает практическую применимость идеи, однако ее работа не носит адаптивный характер.

Разработка алгоритма адаптивного управления. Постоянное использование дополнительной фазы неэффективно, поскольку блокировки возникают не каждый цикл. Поэтому был разработан алгоритм ее адаптивного включения, основная задача которого – заблаговременно обнаружить «стоп-волну», движущуюся к перекрестку.

Содержание алгоритма (рисунок 4):

1. Определение временного окна. Алгоритм активен только в определенный временной интервал внутри цикла. Расчеты, основанные на скорости распространения «старт-волны» и «стоп-волны», показали, что критический интервал, в который возникновение «стоп-волны» гарантированно приведет к блокировке, находится между 19-й и 42-й секундами до окончания разрешающего сигнала по направлению 16.

2. Детекция «стоп-волны». Для обнаружения волны предлагается установить три индуктивных детектора в одной полосе на расстоянии 100 м от стоп-линии перекрестка ул. Притыцкого–пр-т Пушкина. Небольшая зона детекции (0,5 м) и расстояние между детекторами (2,5 м) позволяют надежно фиксировать остановку или медленное движение ТС в плотном потоке.

3. Условие активации. Если в течение определенного временного окна (см. п. 1) хотя бы один из трех детекторов зафиксирует непрерывное присутствие автомобиля в течение порогового времени (экспериментально установлено значение в 10 с), система делает вывод о наличии «стоп-волны».

4. Принятие решения. При выполнении условий (п. 1 и п. 3) алгоритм инициирует включение дополнительной 10-секундной фазы в текущем цикле.

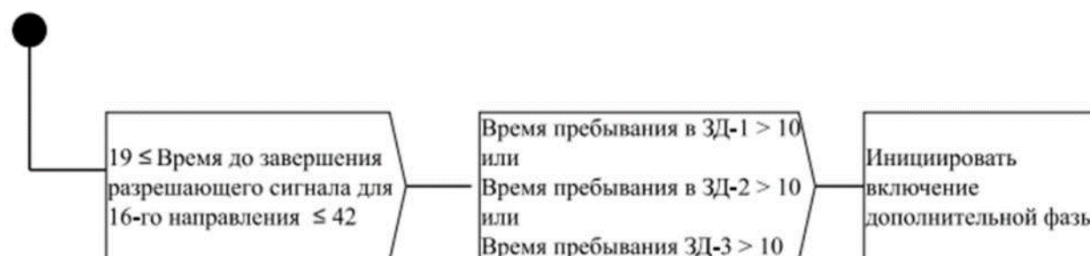


Рисунок 4. – Блок-схема алгоритма

Для внедрения данного алгоритма требуется замена существующего дорожного контроллера ДУМКА-С на более современный (например, СИДК) с поддержкой расширенного функционала и подключения внешних детекторов.

Моделирование и оценка эффективности. Оценка эффективности разработанных мероприятий проводилась с использованием программного комплекса для имитационного микромоделирования SUMO. Была создана и откалибрована по натурным данным детализированная модель исследуемого участка. Калибровка включала настройку параметров модели следования за лидером (модель Краусса) для достижения реалистичного поведения водителей. Кроме того, следует отметить, что детекция «стоп-волны» должна осуществляться только для временного интервала, в котором возникновение «стоп-волны» гарантированно приведет к блокировке движения по ул. Пушкина. Этот интервал можно найти из геометрического построения, представленного на рисунке 5.

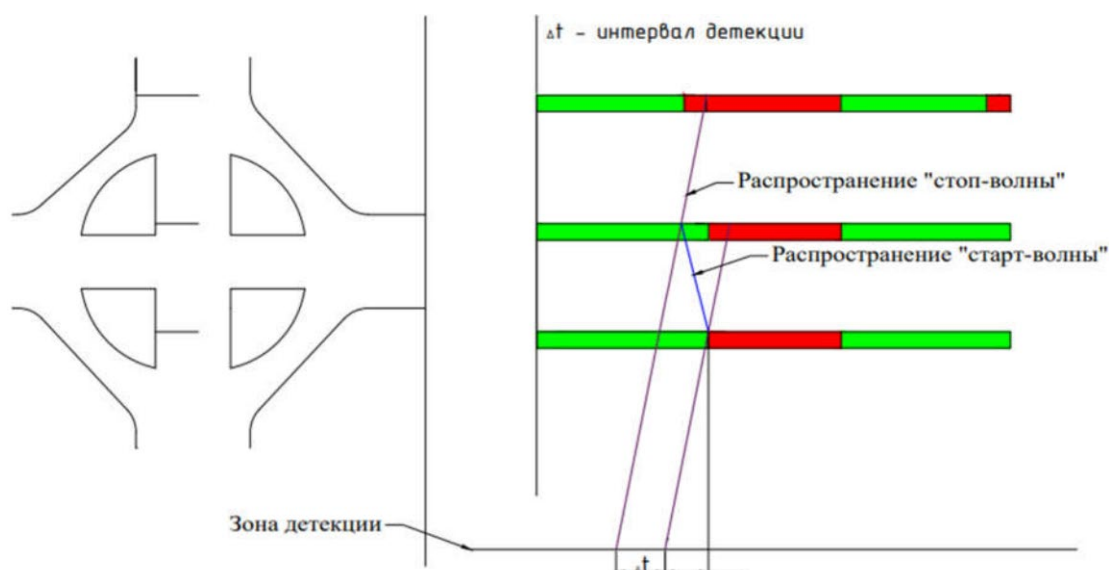


Рисунок 5. – Пространственно-временная схема расчета интервала детекции

Что касается общего местоположения детекторов, то они должны быть установлены после исследуемого транспортного узла на расстоянии 100 м от последней стоп-линии (рисунок 6). Это расстояние обусловлено тем, что необходимо определить потенциальную блокировку перекрестка за 19 с (15 с промежуточный такт второй фазы, 1 с основной такт третьей фазы и 3 с зеленых миганий, которые входят в разрешающий сигнал) до окончания действия разрешающего сигнала для 16-го направления, с расчетом, что «стоп-волна» распространяется со скоростью 5 м/с. Также предполагается, что детекторы будут установлены только в одной полосе, указанной на рисунке 6, поскольку этого достаточно для обнаружения «стоп-волны».

Были проведены симуляции двух сценариев в течение 1 ч пиковой нагрузки:

Сценарий 1 (существующий): моделирование с существующей схемой организации дорожного движения.

Сценарий 2 (предлагаемый): моделирование с внедренными изменениями плана координации и работающим адаптивным алгоритмом включения дополнительной фазы.

Общие часовые задержки для существующего варианта составили 275 авт-ч, а для предлагаемого – 193 авт-ч. Удельные задержки (в среднем на одно ТС) сократились со 125 до 88 с. Таким образом, комплексное внедрение предложенных мероприятий обеспечивает снижение как общих, так и удельных задержек на 30%.

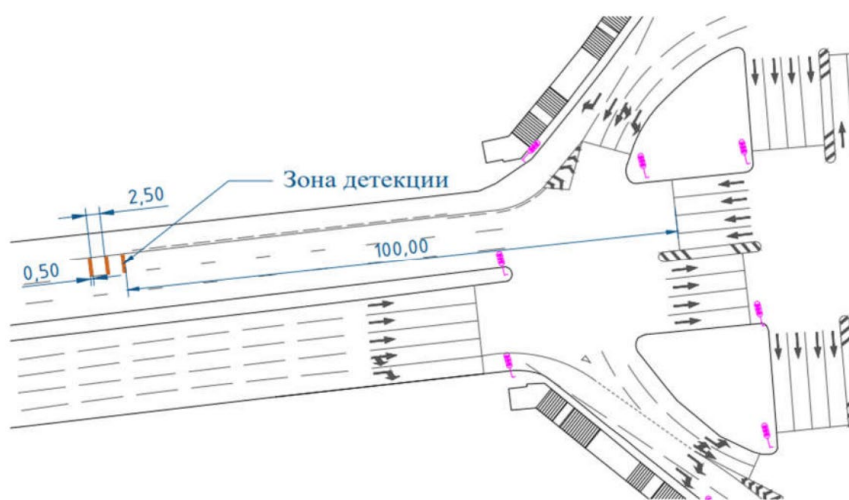


Рисунок 6. – Места установки детекторов

Заключение. В рамках исследования была решена актуальная научно-практическая задача предотвращения блокировок сложного транспортного узла в г. Минске. Выявлен и детально описан механизм возникновения регулярных блокировок на пересечении ул. Притыцкого и пр-та Пушкина, связанный с формированием и распространением «стоп-волны».

Разработан комплексный подход, сочетающий статические и динамические методы управления: предложены изменения в плане координированного управления, снижающие вероятность возникновения «стоп-волны»; обоснована необходимость введения дополнительной фазы светофорного регулирования для принудительного освобождения перекрестка; разработан оригинальный адаптивный алгоритм активации этой фазы, основанный на заблаговременной детекции «стоп-волны» с использованием стандартных детекторов транспорта.

С помощью имитационного моделирования в среде SUMO доказана высокая результативность предложенных решений: снижение общих и удельных транспортных задержек в часы пик составляет 30%.

Разработанный алгоритм и комплекс мероприятий являются эффективным, экономически обоснованным и технически реализуемым решением, которое может быть применено для повышения пропускной способности и надежности функционирования не только исследуемого узла, но и других аналогичных проблемных участков городской уличной сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В. Трансформация элементов дорожно-транспортной инфраструктуры для повышения качества жизни // Современная урбанистика: социальное благополучие и цифровая трансформация города: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. / Минск (30 нояб. 2023 г.) – Минск: М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т, 2024. – С. 167–173. EDN PYQLFZ
2. Энтропия дорожного движения и учет аварийности для оценки устойчивости пассажирского транспорта мегаполиса / Ю.П. Важник, Д.В. Капский, Д.В. Навой и др. // Проблемы безопасности на транспорте: материалы XIII междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году качества. В 2 ч. / Гомель (21–22 нояб. 2024 г.). – Гомель: Белорус. гос. ун-т транспорта, 2024. – С. 51–52. EDN FHCESI

3. Капский Д.В. Методологические основы создания системы повышения безопасности дорожного движения в городских очагах аварийности в Республике Беларусь // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2009. – № 6. – С. 81–88. EDN WXONBB
4. Капский Д.В., Луцкович А.С. Градостроительные аспекты организации движения // Перспективы развития транспортного комплекса: материалы IV Междунар. заоч. науч.-практ. конф. / Минск (02–04 окт. 2018 г.). – Минск: Белорус. науч.-исследоват. ин-т транспорта «Транстехника», 2018. – С. 90–95. EDN YTKOMX
5. Врубель Ю.А., Капский Д.В. Водителю о дорожном движении: пособие для слушателей учебного центра подготовки, повышения квалификации и переподготовки кадров автотракторного факультета. – 3-е изд., доработ. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2010. – 139 с. EDN VRUNOY
6. Рутковский В.Н., Капский Д.В. Анализ, разработка и реализация адаптивных алгоритмов (гибкого) светофорного регулирования // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 3. – С. 4–16. DOI 10.21122/2309-4923-2023-3-4-16. EDN XEUMZW
7. Координированное управление дорожным движением / Ю.А. Врубель, Д.В. Капский, Д.В. Рожанский и др. – Минск: Белорус. нац. техн. ун-т, 2011. – 230 с. EDN TLBBOV

Поступила 30.03.2026

DEVELOPMENT AND EFFECTIVENESS EVALUATION OF AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR PREVENTING TRAFFIC NODE BLOCKAGE

*E. KHASINEVICH¹, V. IVANOV², A. KORZOVA³,
G. KUCHARONAK¹, D. MOZALEVSKI³*

(¹Belarusian National Technical University, Minsk;

²Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;

³Branch of BNTU "Research Polytechnic Institute", Minsk)

The article addresses one of the most acute problems of modern cities – intersection blockage caused by queue spillback from adjacent sections of the road network. Such situations lead to the cascading spread of congestion, a significant increase in traffic delays, and economic losses. The study aims to develop a set of measures and an adaptive traffic signal control algorithm to prevent blockages, using a complex transport node in Minsk – the intersection of Pritytskogo Street and Pushkina Avenue – as a case study. The problem at this node is identified as the regular occurrence of "stop-waves" that propagate from one intersection to another, making it impossible to clear the intersection during the green signal time. A comprehensive approach is proposed, which includes modifying the coordination plan for adjacent intersections, introducing a special additional phase to «flush» the blocked intersection, and developing an algorithm for its adaptive activation. The algorithm is based on data from physical vehicle detectors installed at a certain distance from the intersection for early detection of the «stop-wave». The simulation results showed that the implementation of adaptive control reduces total and specific traffic delays by 30%.

Keywords: *intersection blockage, gridlock, stop-wave, adaptive control, traffic signal control, intelligent transport systems, simulation modeling, traffic management efficiency.*

УДК 625.739:656.05

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-20-27

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ АВАРИЙНОСТИ С УЧАСТИЕМ ВЕЛОСИПЕДИСТОВ И ЛИЦ НА СРЕДСТВАХ ПЕРСОНАЛЬНОЙ МОБИЛЬНОСТИ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ¹, А.В. КОРЖОВА²,
д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ³, Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ²

¹Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск;

²Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск;

³Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлен комплексный ретроспективный и актуальный анализ состояния аварийности на дорогах Республики Беларусь с участием уязвимых категорий участников дорожного движения: велосипедистов и лиц, передвигающихся на средствах персональной мобильности (СПМ), за период с 01.01.2020 по 31.12.2024. Всего за анализируемый период было зарегистрировано 1748 учетных ДТП данной категории. Проведено распределение статистических данных по годам, территориальному (административному) признаку, типам автомобильных дорог и тяжести последствий. Особое внимание уделено беспрецедентному росту числа ДТП в 2024 г. (501 происшествие), а также выявленному феномену повышенной травмоопасности СПМ (1,35 пострадавшего на одно ДТП) по сравнению с велосипедами (0,97 пострадавшего). Выполнена экономическая оценка потерь от дорожно-транспортного травматизма (более 9,4 млн у.е. в 2024 г.). На основе топографического и факторного анализа предложен комплекс инфраструктурных, законодательных и образовательных рекомендаций по снижению аварийности и интеграции микромобильного транспорта в транспортную систему без ущерба для безопасности.

Ключевые слова: безопасность дорожного движения, дорожно-транспортное происшествие (ДТП), средства персональной мобильности (СПМ), электросамокаты, велосипедисты, транспортная инфраструктура, аварийность, социально-экономический ущерб, микромобильность.

Введение. На современном этапе развития транспортных систем в мировой практике наблюдается стремительный переход к концепции устойчивой городской мобильности¹ [13]. Трансформация транспортного поведения граждан выражается во взрывном росте использования микромобильного транспорта: классических и электрических велосипедов, а также средств персональной мобильности (СПМ) – электросамокатов, моноколес, гироскутеров и сегвеев. С одной стороны, микромобильность решает «проблему последней мили», снижает углеродный след, уменьшает загруженность дорожной сети автомобилями и повышает транспортную доступность [1; 11; 12]. С другой – лавинообразное распространение, в первую очередь, шеринговых электросамокатов в городах привело к серьезному обострению проблемы безопасности дорожного движения (БДД). Массовая интеграция скоростных и бесшумных СПМ в пешеходную инфраструктуру (на тротуары), а также пересечение их траекторий с автомобильными потоками генерируют новые, ранее не изученные очаги аварийности. Ввиду слабой защищенности райдеров дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с участием велосипедов и СПМ характеризуются высокой степенью тяжести последствий – как в социальном (травмы, гибель), так и в экономическом отношениях. Отмечено, что существующая практика проектирования улично-дорожной сети, ориентированная на автомобиль, устарела [13].

Исследователями разработаны методы прогнозирования аварийности, основанные на теории конфликтных ситуаций, алгоритмы расчета вероятности ДТП на пересечениях и пешеходных переходах, где наиболее часто гибнут велосипедисты и водители СПМ [1; 2]. Подчеркивается необходимость создания обособленной безбарьерной инфраструктуры, исключаяющей прямой физический контакт потоков с разными скоростными режимами и массой: автомобилей (1000 кг, 60 км/ч), СПМ/велосипедов (15–20 кг, 20–25 км/ч) и пешеходов (4–5 км/ч) [3; 4].

По мнению зарубежных авторов (Götzinger, Eboli, Schepers), появление кикшеринга (проката самокатов) изменило демографию участников движения – ими стали лица, не имеющие опыта вождения и знания правил дорожного движения (ПДД). Медицинская статистика показывает, что для пользователей СПМ характерны специфические черепно-мозговые и челюстно-лицевые травмы из-за смещенного центра тяжести и малого диаметра колес, реагирующих на любые неровности покрытия [5; 6].

В октябре 2022 г. в ПДД Республики Беларусь были внесены изменения, легализующие и определяющие статус СПМ. Лица, передвигающиеся на них, приравнены к пешеходам с правом движения по велодорожкам, а при их отсутствии – по тротуарам, со скоростью не более 25 км/ч.

¹ Капский Д.В. Методология повышения безопасности дорожного движения в городских условиях Республики Беларусь: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.22.10 / Капский Денис Васильевич; Бел. нац. техн. ун-т. – Минск, 2011. – 44 с.

Несмотря на предпринятые правовые шаги, статистические данные указывают на резкий рост аварийности. Существует критический разрыв между популярностью микромобильного транспорта, правовым сознанием пользователей и готовностью дорожной инфраструктуры обеспечить их безопасность. Задачей данного исследования является детальный анализ статистики ДТП в Беларуси за 2020–2024 гг. с целью выявления латентных закономерностей формирования аварийности и обоснования научно-практических путей ее снижения.

Материалы и методы исследования. Основой для исследования послужили сведения Главного управления ГАИ МВД Республики Беларусь о зарегистрированных учетных ДТП за период с 01.01.2020 по 31.12.2024.

В ходе работы применялись следующие методы:

- статистический анализ для выявления абсолютных и относительных показателей динамики ДТП, погибших и раненых;
- метод группировки и кластеризации для районирования показателей по областям и типу автодорог;
- топографический анализ для пространственной оценки концентрации очагов аварийности;
- экономико-математическое моделирование для оценки социально-экономического ущерба государства.

Основная часть. Всего за анализируемый период (2020–2024 гг.) в стране зафиксировано 1748 учетных ДТП с участием велосипедов и СПМ. В этих происшествиях погиб 214 человек и было ранено 1562 человека.

Общие показатели аварийности по годам приведены на рисунке 1.

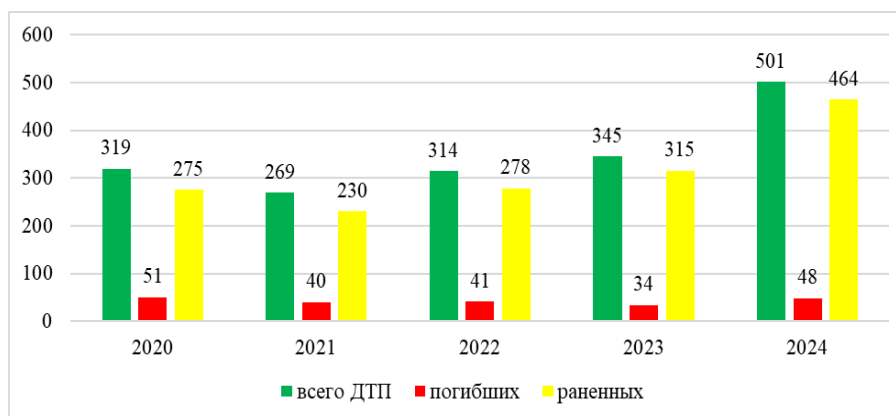


Рисунок 1. – Изменение аварийности по годам

Рассматривая общие показатели, можно выделить несколько этапов развития аварийности:

– 2020–2022 гг.: период флуктуации. Наблюдалось снижение в 2021 г. (с 319 до 269 ДТП), что, вероятно, было связано с отложенными эффектами ограничений активности населения и уменьшения туристических или развлекательных потоков (последствия пандемии COVID-19). Смертность держалась на уровне 40–50 чел./год;

– 2023 год: нарастание напряжения. Плавный рост до 345 ДТП (увеличение раненых до 315). Это год полноценной адаптации общества к обновленным ПДД и резкое расширение парка шеринговых самокатов, вышедших далеко за пределы МКАД г. Минска;

– 2024 год: резкий (экспоненциальный) всплеск. Количество ДТП увеличилось до беспрецедентного значения в 501 случай (+45,2% к предыдущему году). Пропорционально выросло число раненых (464 чел.) и погибших (48 чел.). Этот скачок является главным тревожным индикатором для государственного управления БДД, свидетельствуя о том, что существующая инфраструктурная пропускная способность для микромобильного транспорта в городах полностью исчерпана и началась зона открытого системного конфликта пользователей.

Территориальное распределение. Анализ по административным единицам четко указывает на урбанистическую и географическую специфику распределения рисков.

Минская область (19%) и г. Минск (17%) в сумме аккумулируют 36% всех происшествий. Минск является ядром проблемы как город с максимальной плотностью транспортного, пешеходного потоков и наивысшей концентрацией компаний, сдающих СПМ в аренду. Минская область дает высокий процент из-за маятниковой миграции и интенсивного движения в пристоличной зоне.

Брестская область (18%). Значительный показатель для региона. Брестчина, ввиду благоприятного равнинного рельефа и мягкого климата, исторически имеет самый высокий в Беларуси уровень проникновения велопользования среди местного населения (не только как рекреации, но и как повседневного утилитарного транспорта для поездок на работу в малых городах). Отсюда и высокая база аварийности.

Остальные области – *Могилевская (14%), Гомельская (12%), Витебская (11%), Гродненская (9%)* – демонстрируют зависимость скорее от степени развития инфраструктуры крупных городов региона и числен-

ности населения. Гродненская область демонстрирует наилучшие показатели, что может быть связано с особенностями холмистого рельефа самого г. Гродно, который несколько сдерживает использование маломощных СПМ и лучшей культурой вождения.

Распределение аварийности по административным единицам приведено на рисунках 2, 3.

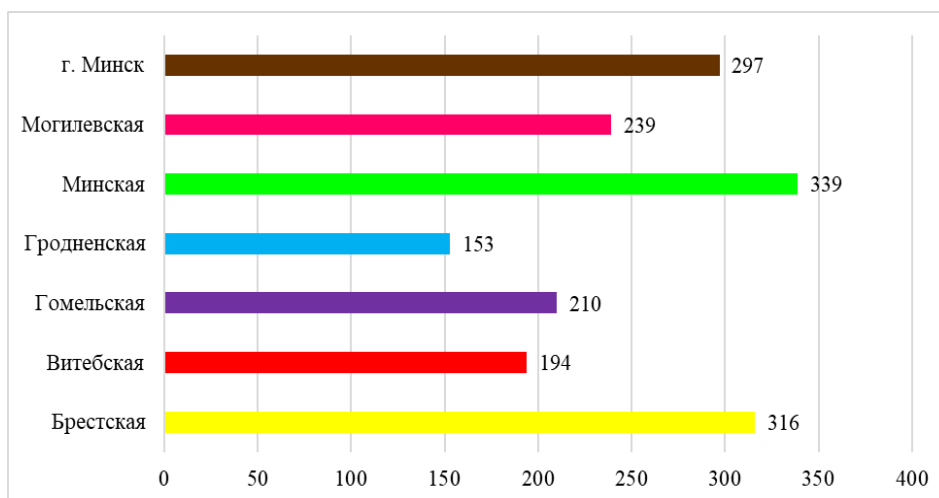


Рисунок 2. – Распределение ДТП по административным единицам

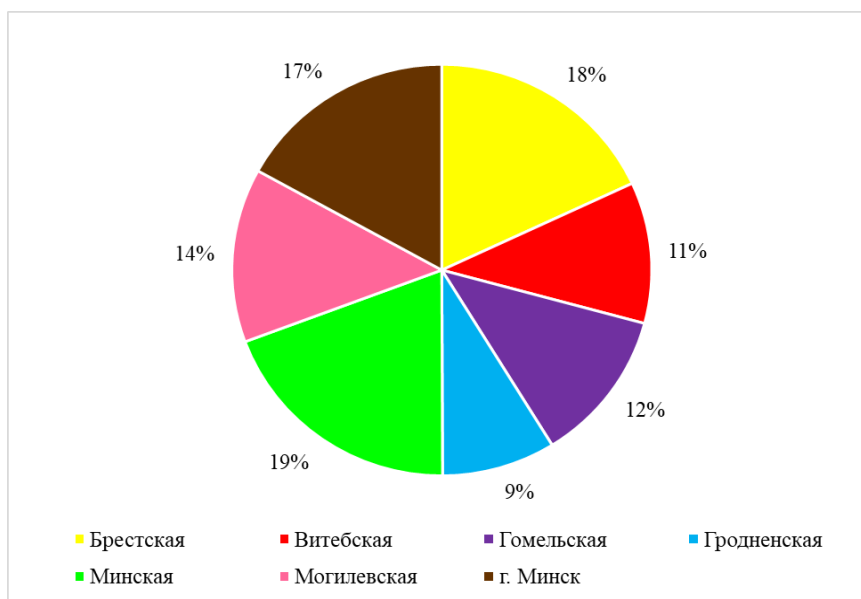


Рисунок 3. – Доля ДТП, приходящихся на каждую административную единицу

Уровень тяжести в зависимости от типа улично-дорожной сети. Наиболее ценные аналитические выводы дает распределение ДТП по месту их совершения (рисунок 4). Большинство инцидентов происходит в населенных пунктах (1263 ДТП, 1218 пострадавших). Однако смертность здесь составляет 63 чел. Показатель летальности (вероятность гибели в ДТП) в городе: $63/1263 \cdot 100 \approx 5\%$. В населенных пунктах действуют городские скоростные ограничения (50–60 км/ч), ДТП в основном происходят на пешеходных переходах, выездах со дворов, где скорости автомобилей снижены.

Радикально иная картина наблюдается за пределами городов:

- местные дороги: 185 ДТП – 54 погибших. Летальность 29,1%;
- республиканские дороги: 245 ДТП – 77 погибших. Летальность $\approx 31,4\%$;
- магистральные дороги: 55 ДТП – 20 погибших. Летальность $\approx 36,3\%$.

Данная статистика обнажает катастрофическую проблему макроуровня. Нахождение велосипедиста (и в особенности лица на СПМ) на обочине или крае проезжей части скоростной трассы в темное время суток (без жилета повышенной видимости, в состоянии опьянения, что часто бывает на местных дорогах в сельской местности) в 1 из 3 случаев заканчивается летально. Кинетическая энергия столкновения при скорости автомо-

била свыше 80–90 км/ч не оставляет уязвимому участнику шансов на выживание [3; 7]. Эта диспропорция доказывает необходимость запрета движения велосипедистов по проезжей части республиканских и магистральных дорог без обособленных физическим барьером велосипедных дорожек за пределами городов.

Распределение ДТП по участкам дорожной сети приведено на рисунке 4.

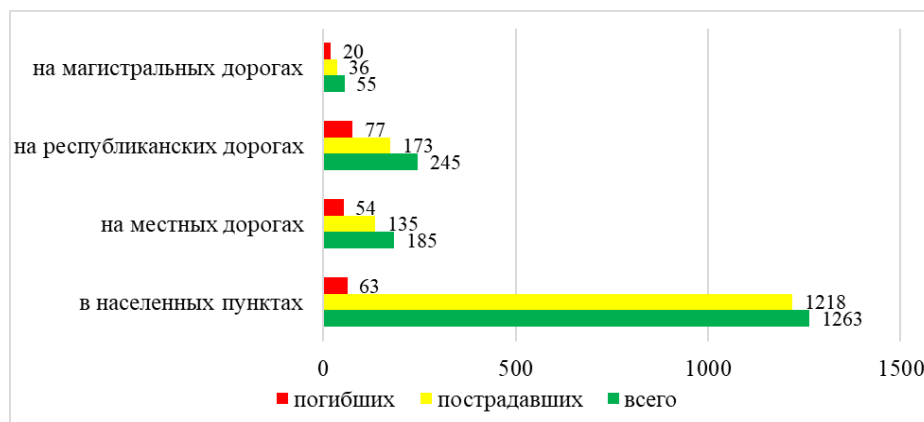


Рисунок 4. – Распределение ДТП по участкам дорожной сети

Данные о аварийности с велосипедистами и средствами персональной мобильности за 2024 г. приведены в таблице 1.

Таблица 1. – Аварийность с велосипедистами и лицами, передвигающимися на средствах персональной мобильности

	Всего (501)	Погибшие (48)	Раненные (464)
ДТП с велосипедистами	432	44	375
ДТП с лицами, передвигающимися на СПМ	69	4	89

Согласно этой статистике, на одно ДТП с СПМ приходится 1,35 пострадавший, а на одно ДТП с велосипедистом – 0,97.

Топографический анализ ДТП в Беларуси выполнен за период 2021–2024 гг. Данные о ДТП с велосипедистами за 2021–2024 гг. получены из базы ДТП ГАИ.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ:

-  – ДТП с гибелью велосипедиста
-  – ДТП с ранением велосипедиста
-  – ДТП с ранением лица, передвигающегося на СПМ
-  – ДТП с гибелью лица, передвигающегося на СПМ

На рисунке 5, например, приведена карты топографического анализа ДТП с велосипедистами в Беларуси за 2024 г. Очаги аварийности отчетливо концентрируются в пределах крупных населенных пунктов. Но качественный визуальный анализ позволяет сделать вывод, что «теплые» и «красные» точки располагаются на линейных объектах с интенсивным пересечением:

- неотрегулированные светофорами нерегулируемые пешеходные переходы (зебры). Водитель поворачивающего автомобиля объективно не успевает отреагировать на электросамокат, который вылетает из «слепой зоны» (из-за припаркованных автомобилей или кустов) на пешеходный переход со скоростью в 5 раз, превышающей скорость пешехода [1; 10];
- выезды со дворов и прилегающих территорий (конфликт с автомобилями);
- сужения тротуаров и остановки общественного транспорта (конфликт «СПМ–пешеход»).

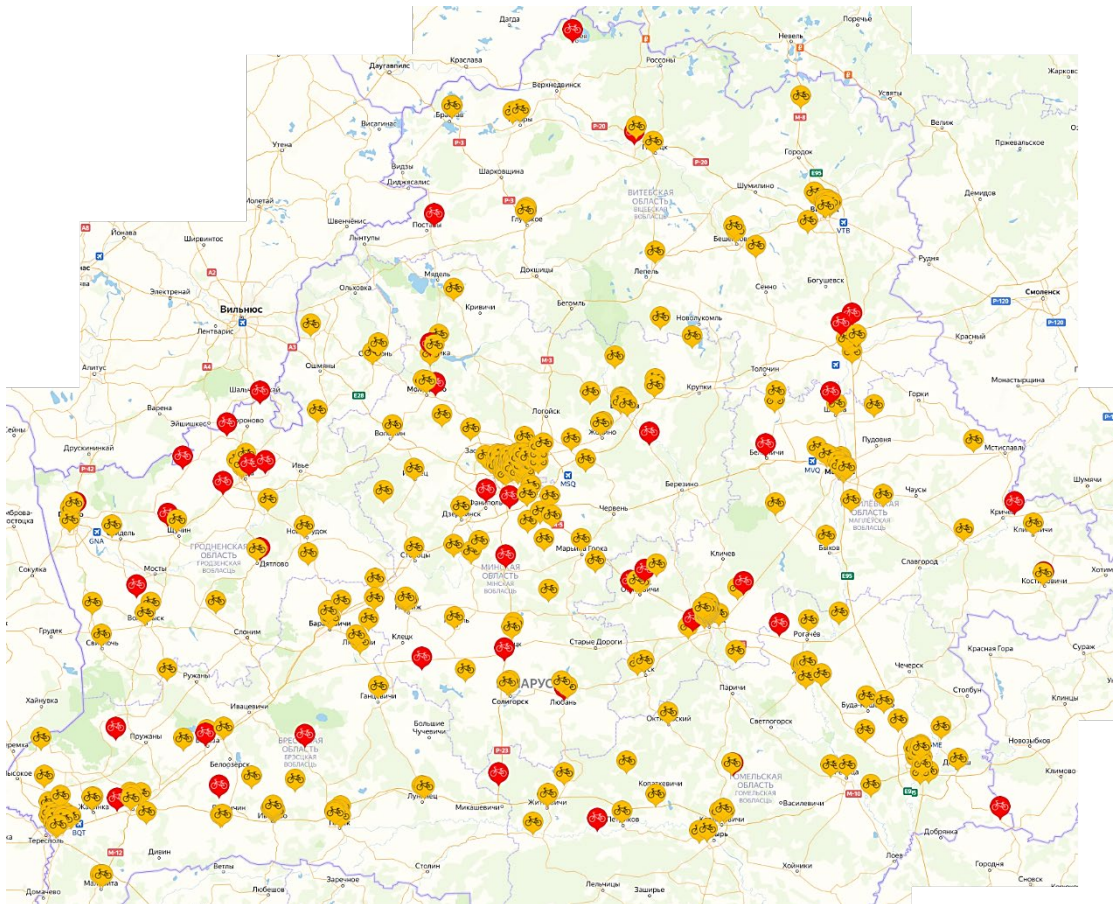


Рисунок 5. – Топографический анализ аварийности с велосипедистами за 2024 г.

В 2024 г. концентрация стала критической в г. Минске и областных центрах, что прямо отражает экспансию бизнеса шеринговых платформ. И согласно исследованиям, с каждым годом количество ДТП с велосипедистами растет. Однако стоит учитывать, что растет и количество лиц, передвигающихся на велосипедах.

Распространение СПМ на территории Беларуси началось с 2015–2016 гг. В 2017 г. на территории г. Минска не было зарегистрировано ни одного ДТП с участием СПМ. По истечении пяти лет ГАИ зафиксировало 22 таких происшествия. В 2023 г. на территории Беларуси произошло 30 ДТП с участием СПМ (все получили ранения).

Дорожно-транспортные происшествия с лицами, передвигающимися на средствах персональной мобильности, начали регистрировать с 2018 г., но в базу ДТП данные о таких происшествиях вносились как происшествия с велосипедистами. Это происходило ввиду того, что СПМ не выделялись как отдельная категория транспортных средств.

Топографический анализ аварийности с лицами, передвигающимися на средствах персональной мобильности, за 2024 г. приведен на рисунке 6.

Анализ парадокса «множественных травм» на СПМ (специфика 2024 г.). Важным этапом эволюции сбора статистики ГАИ стало обособление данных по средствам персональной мобильности в 2024 г., т.к. ранее (с 2018 г.) их классифицировали вместе с велосипедистами. Данные за 2024 г. выявляют структурный сдвиг:

- велосипедисты (432 ДТП): 44 погибших, 375 раненых. *Коэффициент пострадавших на 1 ДТП = 0,97.* (значение меньше 1 обусловлено тем, что в части аварий велосипедист чудом отделялся испугом или легкими ушибами без официальной госпитализации, но наносил урон чужому имуществу, что переводило ДТП в учетное);
- лица на СПМ (69 ДТП): 4 погибших, 89 раненых. *Коэффициент пострадавших на 1 ДТП = 1,35.*

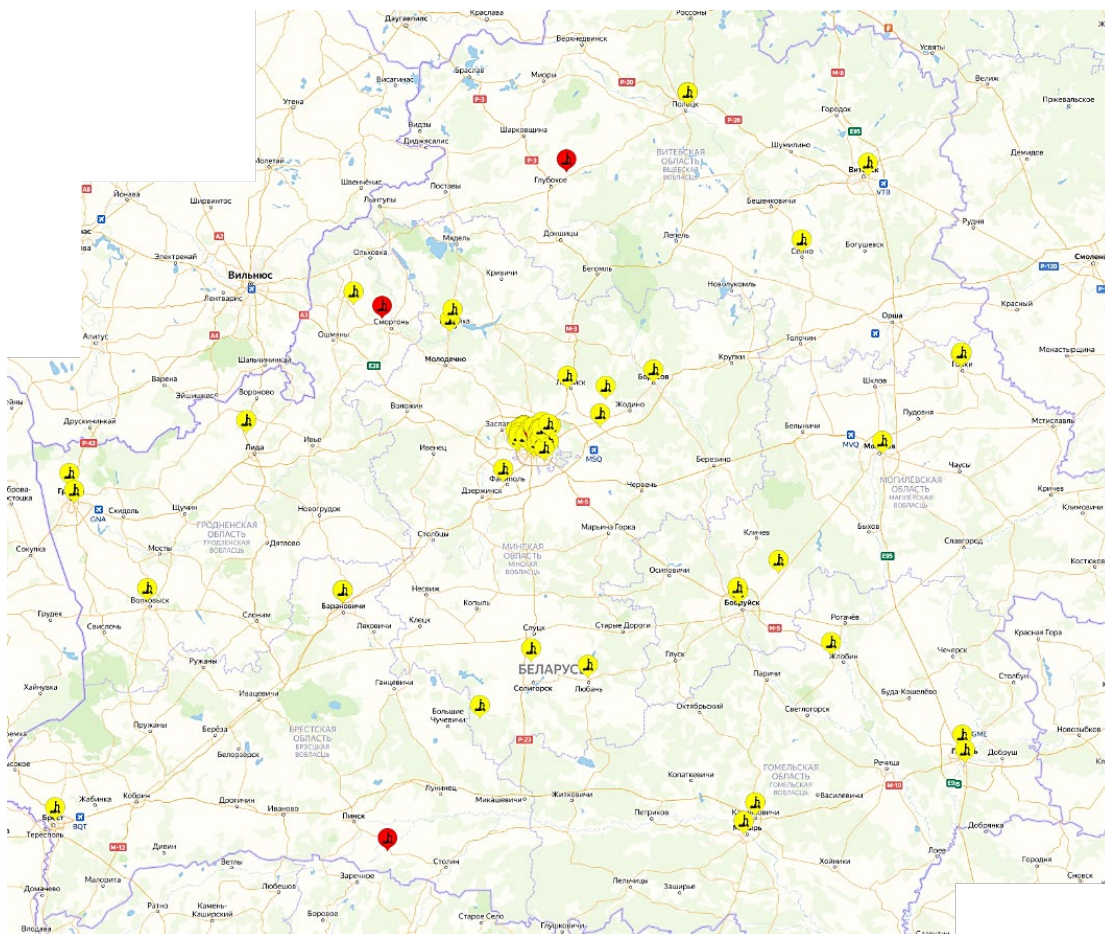


Рисунок 6. – Топографический анализ аварийности с СПМ за 2024 г.

Научное объяснение феномена. Как получилось, что при 69 авариях пострадало 93 человека? Этот коэффициент в 1,35 научно подтверждает самую злостную проблему шеринговой микромобильности:

– *тандемная езда*. Пользователи массово нарушают запрет на перевозку пассажиров. Два подростка/взрослых, стоящие на одной деке арендованного электросамоката, многократно перегружают конструкцию. Руль становится трудно управляемым, тормозной путь увеличивается на 40–60%. При падении или столкновении с препятствием травмы получают оба лица;

– *наезды на пешеходов на тротуарах*. Поскольку закон предписывает СПМ двигаться по тротуарам, тяжелые (до 25–30 кг) электросамокаты, двигающиеся со скоростью 25 км/ч, в случае конфликта травмируют не только райдера (вылетающего через руль), но и сбитого пешехода (часто это пожилые люди или дети, для которых удар приводит к тяжелым переломам) [8]. ДТП классифицируется как одно, но «скорая помощь» увозит двух человек. У велосипедистов (0,97) езда вдвоем физически реже возможна на спортивных или городских рамах без багажника, а масса аппарата (12–15 кг) наносит меньший кинетический урон пешеходу;

Оценка социально-экономического ущерба. Дорожно-транспортные происшествия – это не только трагедии для семей, но и огромный удар по национальной экономике. Социально-экономический ущерб от гибели и ранений граждан складывается из прямых и косвенных потерь (недополученный валовой внутренний продукт, затраты системы здравоохранения, пенсии по инвалидности, спасательные работы) [2]. Потери от аварийности за 2020–2024 гг приведены в таблице 2.

Таблица 2. – Потери от аварийности за 2020–2024 гг.

Год	Стоимость аварий со смертельным исходом, тыс. у.е./год	Стоимость аварий с пострадавшими, тыс. у.е./год	Суммарные аварийные потери, тыс. у.е./год
2020	7650	1320	8970
2021	6000	1104	7104
2022	6150	1334,4	7484,4
2023	5100	1512	6612
2024	7200	2227,2	9427,2

Если в 2023 г. потери были на уровне 6,61 млн у.е., то в 2024 г. произошел резкий рост на 42% – до 9 427 200 у.е. При этом основная доля материальных потерь (7 200 000 у.е.) формируется именно за счет безвозвратных потерь (смертей участников ДТП). Суммарный ущерб за 5 лет превысил 39,6 млн у.е. Данные цифры служат мощнейшим экономическим обоснованием того факта, что выделение бюджетных средств на проектирование, строительство велодорожек и снижение городского скоростного режима – это не убытки для бюджета, а *прямые и высококупаемые инвестиции*. Затраты на прокладку качественной велоинфраструктуры в сотни раз ниже, чем экономические потери государства от лечения тяжелых черепно-мозговых травм пользователей СПМ и потери человеческого капитала [9].

Заключение, выводы и рекомендации. Период с 2020 по 2024 гг. в Республике Беларусь был отмечен стабильным формированием нового вектора аварийности на дорогах и тротуарах, триггером которого выступает появление и лавинообразное распространение микромобильных транспортных средств. 2024 год продемонстрировал антирекорд – 501 ДТП. Экономика страны ежегодно теряет миллионы долларов из-за тяжести травм уязвимых участников. Главной методологической проблемой является сохраняющееся совмещение потоков пешеходов и скоростных механических/электрических средств, а также совмещение велопотоков и тяжелых автомобилей на загородных трассах.

Для купирования сложившейся кризисной тенденции предлагается комплекс мер, разделенный по международно признанному принципу «3Е» (Engineering, Enforcement, Education – Инженерия, Контроль, Образование):

– *инженерно-инфраструктурные рекомендации (Engineering)*. Основа БДД кроется в исключении самых конфликтных ситуаций. Необходимо системное создание обособленных от тротуаров велосипедных дорожек за счет сужения или перераспределения ширины проезжей части, а не за счет «расчерчивания» краской зон на пешеходном тротуаре. Физическая изоляция пешеходов (4 км/ч), велосипедов/СПМ (25 км/ч) и авто (50 км/ч) – единственный путь концепции Vision Zero.

Для загородных магистралей и республиканских дорог – запрет или максимальное ограничение движения велосипедов по обочине с поэтапным проектированием велодорожек в отводе трасс. Приподнятые проезды на перекрестках («лежачие» столы) в городах;

– *законодательные и контрольные рекомендации (Enforcement)*. Очевидная доказанность множественного травматизма (1,35 чел./ДТП для СПМ) требует введения камер фотовидеофиксации или систем искусственного интеллекта на самих шеринговых аппаратах для автоматической жесткой блокировки самоката и крупного штрафа аккаунта пользователя в случае попытки езды вдвоем (в тандеме). Ряд мировых шеринг-компаний уже тестирует датчики распределения веса, эту технологию необходимо сделать законодательным условием для ведения бизнеса в Республике Беларусь.

Усиление контроля скорости в «Slow zones». Установить предел для СПМ в парках, пешеходных улицах, местах массового скопления не 25 км/ч, а программным методом геофенсинга ограничивать их скорость на уровне программного обеспечения шеринговых компаний до 10–12 км/ч;

– *образовательно-административные (Education)*. Запрет на использование шеринговых СПМ лицам, не прошедшим базовый верифицированный электронный тест на знание ПДД в самом мобильном приложении прокатчика. Введение обязательной верификации возраста через системы Межведомственной информационной системы (МСИ) МВД Республики Беларусь для полного исключения несовершеннолетних из числа арендаторов скоростных самокатов (доступ только лицам 18+).

Только применение интегрального системного подхода способно переломить тревожную кривую статистики 2024 года, спасти человеческие жизни и сэкономить макроэкономические ресурсы государства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устойчивые транспортные системы городов: учеб. / Д.В. Капский, А.О. Лобашов, И.Н. Пугачев и др. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. – 128 с.
2. Капский Д.В. Прогнозирование аварийности в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2008. – 242 с.
3. 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. EDN JHSSJB
4. Врубель Ю.А., Капский Д.В. Опасности в дорожном движении. – М.: Новое знание, 2013. – 244 с.
5. Kapski D., Semtchenkov S., Khmel'nitskaya L. Measures to Improve the Operation of Passenger Transport and Urban Mobility // Komunikacie. – 2023. – Vol. 25, No. 1. – P. A14–A25. DOI 10.26552/com.c.2023.007. EDN GQUPFC
6. Капский Д.В., Пегин П.А., Евтюков С.А. Определение экологических потерь в населенном пункте от движения транспортных средств // Вода и экология: проблемы и решения. – 2017. – № 3(71). – С. 147–158. DOI 10.23968/2305-3488.2017.21.3.147-158. EDN ZUEHNF
7. Капский Д.В. Совершенствование организации дорожного движения на пешеходных переходах // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2006. – № 6. – С. 62–64. EDN SFBCUD
8. Капский Д.В. Методология повышения безопасности движения в городских очагах аварийности: принципы и способы // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 3(57). – С. 59–65. EDN XRJLEF

9. Капский Д.В. Трансформация элементов дорожно-транспортной инфраструктуры для повышения качества жизни // Современная урбанистика: социальное благополучие и цифровая трансформация города: сб. материалов междунар. науч.-практ. конф. / Минск (30 нояб. 2023 г.) – Минск: М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т, 2024. – С. 167–173. EDN PYQLFZ
10. Капский Д.В. Повышение качества дорожного движения в очагах аварийности // Наука и техника. – 2015. – № 3. – С. 36–43. EDN VBQRIL
11. Перспективы дальнейшего применения средств персональной мобильности в мегаполисах / Д.В. Капский, Н.А. Филиппова, С.С. Семченков и др. // Актуальные вопросы экономики и управления: современные тенденции, вызовы и новые возможности: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. / Махачкала (05–06 дек. 2024 г.). – Махачкала: Индивидуальный предприниматель Тагиев Рамидин Хейрудинович, 2024. – С. 260–265. EDN GEIDUL
12. Социально-экономические аспекты применения средств персональной мобильности для развития мегаполисов / Д.В. Капский, Н.А. Филиппова, С.С. Семченков и др. // Актуальные вопросы экономики и управления: современные тенденции, вызовы и новые возможности: сб. ст. междунар. науч.-практ. конф. / Махачкала (05–06 дек. 2024 г.). – Махачкала: Индивидуальный предприниматель Тагиев Рамидин Хейрудинович, 2024. – С. 265–269. EDN UWJRN0
13. Организация велосипедного движения в городах / И.Н. Пугачев, Д.В. Капский, А.С. Луцкович и др.; под общ. ред. Д.В. Капского. – Хабаровск: Тихоокеан. гос. ун-т, 2020. – 227 с. EDN DXLLOF

Поступила 03.04.2026

ANALYSIS OF ROAD ACCIDENTS INVOLVING CYCLISTS AND PERSONAL MOBILITY VEHICLES IN THE REPUBLIC OF BELARUS

D. KAPSKI¹, A. KORZOVA², V. IVANOV³, D. MOZALEVSKI²
(¹Higher Attestation Commission of the Republic of Belarus, Minsk;
²Branch of BNTU "Research Polytechnic Institute", Minsk;
³Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

This article presents a comprehensive retrospective and current analysis of accidents on the roads of the Republic of Belarus involving vulnerable road users: cyclists and personal mobility vehicles (PMVs), for the period from January 1, 2020, to December 31, 2024. A total of 1,748 accidents in this category were recorded during the analyzed period. The statistical data is categorized by year, territorial (administrative) region, road type, and severity of the accidents. Particular attention is paid to the unprecedented increase in road accidents in 2024 (501 incidents), as well as the identified phenomenon of increased injury risk with personal mobility devices (1.35 victims per accident) compared to bicycles (0.97 victims). An economic assessment of road traffic injury losses was conducted (over 9.4 million USD in 2024). Based on topographic and factor analysis, a set of infrastructural, legislative, and educational recommendations is proposed to reduce accidents and integrate micromobility into the transportation system without compromising safety.

Keywords: road safety, road accidents (RADs), personal mobility devices (PMDs), electric scooters, cyclists, transport infrastructure, accident rates, socioeconomic damage, micromobility.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ В УСЛОВИЯХ ИНЦИДЕНТОВ НА УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ

И.В. УРБАНОВИЧ¹, д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ², А.В. КОРЖОВА³

Г.М. КУХАРЕНКО¹, Д.В. МОЗАЛЕВСКИЙ³

(¹Белорусский национальный технический университет, Минск;

²Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой;

³Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Минск)

Статья посвящена актуальной проблеме снижения негативных последствий от инцидентов на улично-дорожной сети городов. Рассмотрена проблема прогнозирования перераспределения транспортных потоков, возникающая вследствие непредвиденных блокировок движения. Целью исследования является разработка программного комплекса, способного в режиме, близком к реальному времени, моделировать развитие дорожной ситуации и предоставлять прогноз для принятия оперативных управленческих решений. Для достижения поставленной цели был проведен анализ существующих подходов к моделированию транспортного спроса, на основе которого был выбран метод динамического неравновесного распределения как наиболее адекватно описывающий поведение водителей в условиях инцидентов. В качестве инструментальной платформы использована среда имитационного микромоделирования SUMO. Разработана и откалибрована имитационная модель репрезентативного участка УДС г. Минска, погрешность которой по интенсивности движения на ключевых пересечениях не превысила 5%. Создан программный комплекс, состоящий из модуля управления имитационной моделью (на языке Python с использованием API TraCI) и модуля графического интерфейса пользователя (на базе библиотеки PyQt5). Экспериментальное исследование показало, что применение разработанного комплекса для прогнозирования и превентивного изменения режимов светофорного регулирования позволяет снизить средние задержки транспорта в зоне инцидента на 21%. Расчетный годовой экономический эффект от внедрения предлагаемого решения составил около 31 тыс. у.е. при сроке окупаемости капитальных вложений в 1,85 года.

Ключевые слова: транспортное моделирование, перераспределение транспортных потоков, транспортный инцидент, имитационная модель, SUMO, прогнозирование, интеллектуальные транспортные системы, оптимизация трафика.

Введение. Современные города сталкиваются с постоянно растущим уровнем автомобилизации, что неизбежно приводит к перегрузке улично-дорожной сети (УДС) и возникновению заторов [1–3]. Наиболее острые и масштабные транспортные проблемы возникают не в результате регулярных суточных колебаний спроса, а вследствие непредвиденных событий – инцидентов [4–6]. К таким инцидентам относятся дорожно-транспортные происшествия (ДТП), поломки транспортных средств, временные перекрытия полос для проведения дорожных работ и другие события, нарушающие нормальный режим движения [7–11].

Возникновение инцидента провоцирует цепную реакцию: локальное снижение пропускной способности вызывает резкое увеличение задержек, что заставляет водителей искать альтернативные маршруты [8; 9; 12]. Этот стихийный процесс перераспределения потоков часто приводит к каскадному распространению затора на соседние улицы, вызывая эффект «взаимоблокировки перекрестков» и коллапс на значительной части городской сети [1; 2; 8; 13]. Последствия таких событий носят комплексный характер: это прямые экономические потери из-за увеличения времени в пути и расхода топлива, ухудшение экологической обстановки, а также значительные социальные издержки [15].

В этих условиях ключевую роль приобретают системы оперативного управления дорожным движением, являющиеся частью интеллектуальных транспортных систем (ИТС). Однако их эффективность напрямую зависит от способности не только реагировать на уже случившееся событие, но и прогнозировать его развитие. Возможность получить краткосрочный (до нескольких часов) прогноз перераспределения потоков позволяет дорожным службам принимать превентивные меры: заблаговременно изменять планы координации светофоров, выводить информацию для водителей на динамические табло, корректировать маршруты общественного транспорта.

Одним из наиболее эффективных инструментов для решения задачи прогнозирования является имитационное моделирование. Создание программных комплексов, базирующихся на адекватных транспортных моделях, дает возможность в режиме, близком к реальному времени, «проигрывать» сценарии развития инцидентов и оценивать эффективность различных управляющих воздействий.

Целью данной работы является разработка и апробация программного комплекса для оперативного прогнозирования перераспределения транспортных потоков на УДС, вызванного возникновением инцидента. Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проанализировать существующие подходы к моделированию распределения транспортных потоков и выбрать наиболее подходящий для описания ситуаций с инцидентами.
2. Выбрать инструментальные средства для построения имитационной модели и разработки программного обеспечения.
3. Создать, откалибровать и верифицировать имитационную модель репрезентативного участка УДС г. Минска.
4. Разработать архитектуру и реализовать программный комплекс, включающий модули управления моделью и графического интерфейса.
5. Провести вычислительные эксперименты для оценки результативности и экономической эффективности предлагаемого решения.

Основная часть. *Анализ подходов к моделированию и выбор методологии.* Процесс распределения транспортных средств по маршрутам в сети описывается четырехстадийной моделью транспортного спроса^{1,2} [14]. Ключевым этапом в контексте нашей задачи является последний – распределение корреспонденций по конкретным маршрутам. Существующие подходы можно классифицировать по двум признакам: статическое или динамическое распределение и равновесный или неравновесный подход.

Статическое распределение предполагает, что маршруты для всех пар «источник–назначение» рассчитываются один раз до начала моделирования и не меняются во времени. Динамическое распределение учитывает изменение дорожной ситуации и позволяет пересчитывать маршруты в ходе симуляции.

Согласно равновесному подходу, основанному на принципах пользовательского равновесия Уордропа (Wardrop), в состоянии равновесия время в пути на всех используемых маршрутах между одной и той же парой «источник–назначение» одинаково и минимально. Неравновесный подход описывает ситуацию, когда водители не обладают полной информацией о сети или реагируют на внезапные изменения, выбирая маршруты, которые не обязательно приводят систему в состояние равновесия.

В штатных условиях дорожное движение стремится к состоянию, близкому к равновесному. Однако при возникновении инцидента ситуация кардинально меняется. Водители, столкнувшись с непредвиденной задержкой, начинают активно менять маршруты, основываясь на сиюминутной информации, собственном опыте или указаниях навигационных систем. Этот процесс является динамическим и по своей природе неравновесным. Следовательно, для адекватного моделирования последствий инцидентов наиболее подходящим является динамическое распределение на основе неравновесного подхода. Данный подход позволяет моделировать отклонение транспортных средств от их привычных маршрутов в ответ на внешние (информация на табло) или внутренние (превышение порога задержки) раздражители.

Разработка и калибровка имитационной модели. В качестве объекта исследования был выбран репрезентативный участок УДС в центральной части г. Минска, включающий фрагменты Советского, Первомайского и Партизанского районов. Участок ограничен магистральными улицами (пр-т Независимости, ул. Сурганова, ул. Козлова, пр-т Машерова и др.), характеризуется высокой интенсивностью движения, наличием 49 светофорных объектов и множеством альтернативных маршрутов, что делает его сложным для аналитического прогнозирования.

Для реализации модели был выбран программный пакет микромоделирования Eclipse SUMO (Simulation of Urban MObility). Ключевыми преимуществами SUMO являются: открытый исходный код, высокая производительность, поддержка микроскопического моделирования (каждое транспортное средство является отдельным объектом), а также наличие мощного API – TraCI (Traffic Control Interface), позволяющего управлять симуляцией в режиме «онлайн» из внешних приложений.

Процесс создания модели включал несколько этапов:

1. Создание транспортной сети: на основе картографических данных была построена граф-модель участка УДС, включающая все дороги, перекрестки, полосы движения и светофорные объекты с их актуальными фазовыми диаграммами.
2. Оценка транспортного спроса: поскольку готовая матрица корреспонденций для исследуемого участка отсутствовала, был проведен сбор натурных данных об интенсивностях на всех входах и выходах участка. На основе этих данных с использованием гравитационной модели была восстановлена матрица «источник–назначение». Расчет объема корреспонденций (q_{ij}) между входом i и выходом j производился по формуле

$$q_{ij} = A_i B_j (o_i * d_j) / (e^{l * \gamma}),$$

где o_i , d_j – объемы транспортного спроса на i -м входе и j -м выходе; l – длина кратчайшего маршрута; γ – параметр модели, отражающий чувствительность к длине маршрута; A_i , B_j – балансировочные коэффициенты (находятся с помощью процедуры балансировки).

¹ U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration Traffic Analysis Toolbox Volume XIV: Guidebook on the Utilization of Dynamic Traffic Assignment in Modeling.

² U.S. BUREAU OF PUBLIC ROADS, EDITOR. Traffic Assignment Manual. – U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., 1964.

3. Калибровка и валидация модели: калибровка модели производилась путем подстройки параметра γ для достижения максимального соответствия модельных и реальных интенсивностей. Валидация проводилась путем сравнения суммарных интенсивностей движения по всем полосам на двух ключевых перекрестках: пр. Независимости – ул. Сурганова и ул. Якуба Колоса – ул. Сурганова. Сравнение показало, что относительная погрешность модельных данных по отношению к реальным не превышает 5%, что позволяет сделать вывод об адекватности созданной модели реальной дорожной ситуации.

Структура и реализация программного комплекса. Разработанный программный комплекс имеет модульную структуру, обеспечивающую гибкость и возможность дальнейшего расширения. Он состоит из трех основных компонентов (рисунок 1):

1. Имитационная модель SUMO: ядро системы, выполняющее микроскопическое моделирование движения транспортных потоков.
2. Программный модуль управления моделью: внешнее приложение, написанное на языке программирования Python, которое взаимодействует с моделью SUMO через API TraCI.
3. Программный модуль графического интерфейса (GUI): оконное приложение для пользователя (диспетчера), реализованное с использованием библиотеки PyQt5.



Рисунок 1. – Общая структура программного комплекса

Модуль управления реализует ключевую логику работы комплекса и включает два подмодуля:

- подмодуль создания инцидента позволяет пользователю через GUI указать географические координаты инцидента. Модуль находит ближайшую полосу движения и останавливает на ней транспортное средство (существующее или вновь созданное), тем самым симулируя блокировку;
- подмодуль перемаршрутизации реализует неравновесный подход к распределению. С заданным временным интервалом (например, 60 с) модуль запрашивает у SUMO данные о времени простоя для каждой полосы движения. Для снижения вычислительной нагрузки и сглаживания случайных всплесков рассчитывается медианное значение времени простоя за последние 30 измерений. Если медианное значение на какой-либо полосе превышает заданные пользователем пороговые значения (например, 300, 400, 600 с), эта полоса попадает в список проблемных. Затем для транспортных средств, находящихся на этих полосах, запускается процесс перемаршрутизации. Учитывая, что не все водители меняют маршрут одновременно, в GUI предусмотрена возможность задать процент водителей, которые примут решение о смене маршрута при достижении каждого из порогов.

GUI обеспечивает интуитивно понятное взаимодействие диспетчера с системой. Оно позволяет загрузить модель, задать параметры инцидента и порогов перемаршрутизации, запустить симуляцию и визуализировать результаты. Для наглядного представления проблемных зон на карте SUMO полосы, где время простоя превышает пороговые значения, подсвечиваются красным цветом. Разработанный комплекс на типовом компьютере способен смоделировать ситуацию на два часа вперед за пять минут реального времени, что соответствует требованиям оперативного прогнозирования.

Оценка экономической эффективности. Для оценки эффективности разработанного комплекса было проведено моделирование двух сценариев на временном отрезке 1,5 ч (нормативное время ликвидации последствий ДТП).

- сценарий 1 (существующая ситуация): моделируется инцидент с блокировкой одной полосы на оживленном участке. Управление светофорами остается в штатном режиме;
- сценарий 2 (предлагаемая ситуация): моделируется тот же инцидент, но предполагается, что на основе прогноза, полученного от комплекса, через 10 мин после начала инцидента на нескольких ключевых перекрестках активируются заранее разработанные специальные диаграммы светофорного регулирования, направленные на минимизацию заторов.

По результатам 15 прогонов для каждого сценария были определены общие часовые задержки транспорта. Расчеты показали, что *средняя задержка в существующей ситуации составляет 1516 авт.-ч, в то время как в предлагаемой – 1204 авт.-ч.* Таким образом, прогнозирование и превентивное управление позволяют *снизить задержки транспорта на 21%*. Экономический эффект и короткий срок окупаемости подтверждают целесообразность внедрения подобных систем прогнозирования.

Разработан подмодуль графического интерфейса для предоставления результатов моделирования пользователю в простом виде.



Рисунок 2. – Графическое представление результатов моделирования

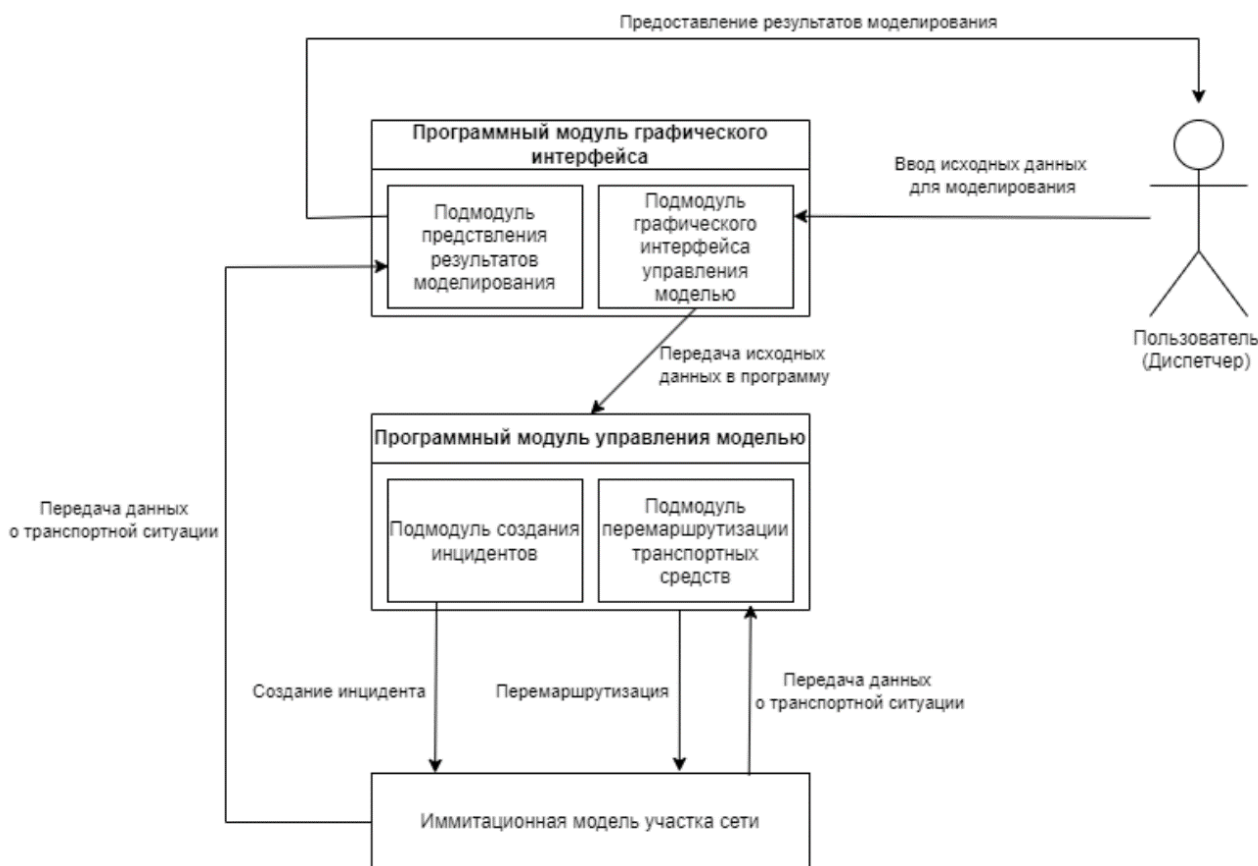


Рисунок 3. – Принципиальная схема работы программного комплекса

В качестве отправного был использован графический интерфейс, предоставляемый пакетом SUMO (sumogui). В разрабатываемом подмодуле предусмотрено предоставление пользователю информации о превышении времени простоя пороговых значений в виде изменения цвета соответствующих полос на красный и отображение красных кругов в месте их локализации (см. рисунок 2). Такое представление облегчает пользователю эффективно локализовать проблемные участки и соответственно своевременно принимать управляющие решения.

В ходе разработки программного продукта, была создана имитационная модель выбранного участка реальной сети города. Верификация модели показала, что отклонения от реальных значений на выбранных пересечениях не превышает 5%. Разработаны программные модули управления моделью и графического интерфейса. Разработанный программный комплекс на типовом компьютере способен смоделировать ситуацию на 2 ч вперед за 5 мин. Принципиальная схема работы – см. рисунок 3.

Заключение. В ходе выполненного исследования была решена важная научно-практическая задача разработки программного комплекса для оперативного прогнозирования последствий транспортных инцидентов. На основе анализа существующих методологий был обоснован выбор динамического неравновесного подхода к моделированию, который наиболее реалистично отражает поведение участников дорожного движения в нестандартных ситуациях. Созданная и верифицированная имитационная микромодель участка УДС г. Минска в среде SUMO продемонстрировала высокую адекватность (погрешность < 5%), что позволяет использовать ее в качестве надежного инструмента для прогнозирования. Разработанный программный комплекс с интуитивно понятным графическим интерфейсом обеспечивает высокую производительность, позволяя получить прогноз развития ситуации на 2 часа вперед в течение 5 мин, что критически важно для принятия оперативных решений. Результаты вычислительных экспериментов показали, что использование прогнозов для превентивного управления светофорными объектами способно снизить общие транспортные задержки в зоне влияния инцидента на 21%. Расчеты подтвердили высокую экономическую эффективность предлагаемого решения, с годовым экономическим эффектом более 31 тыс. у.е. и сроком окупаемости менее двух лет.

Таким образом, разработанный программный продукт является действенным инструментом для повышения эффективности работы центров управления дорожным движением и снижения негативных последствий от транспортных инцидентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Капский Д.В. Анализ существующих подходов к прогнозированию аварийности в дорожном движении / Вестник Белорусского национального технического университета. – 2008. – № 5. – С. 58–63. EDN TQIFBY
2. Капский Д.В. Методология повышения безопасности движения в городских очагах аварийности: принципы и способы // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, № 3(57). – С. 59–65. EDN XRJLEF
3. Капский Д.В. Повышение качества дорожного движения в очагах аварийности // Наука и техника. – 2015. – № 3. – С. 36–43. EDN VBQRIL
4. Лагереv Р.Ю., Капский Д.В. Снижение вероятности образования транспортных заторов на дорогах высших категорий управлением доступом к сети // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 52–60. EDN VQBMWH
5. Оценка эффективности движения транспортных потоков на основе обработки навигационных данных о движении транспортных средств / Д.В. Капский, В.В. Касьяник, А.В. Евтух и др. // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 5. – С. 444–454. DOI 10.21122/2227-1031-2017-16-5-444-454. EDN XQGIER
6. Капский Д.В., Навой Д.В. Развитие автоматизированной системы управления дорожным движением Минска как части интеллектуальной транспортной системы города // Наука и техника. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 38–47. DOI 10.21122/2227-1031-2017-16-1-38-48. EDN YMFDXR
7. Капский Д.В., Навой Д.В., Пегин П.А. Управление в интеллектуальной транспортной системе г. Минска // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 5. – С. 401–412. DOI 10.21122/2227-1031-2018-17-5-401-412. EDN YOLTLI
8. Капский Д.В., Шуть В.Н., Пегин П.А. Графовая модель конфликтного взаимодействия транспортных средств на различных перекрестках // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 3. – С. 246–254. DOI 10.21122/2227-1031-2018-17-3-246-254. EDN YOFSEV
9. Капский Д.В., Навой Д.В., Пегин П.А. Разработка модели транспортных потоков на улично-дорожной сети города // Наука и техника. – 2019. – Т. 18, № 1. – С. 47–54. DOI 10.21122/2227-1031-2019-18-1-47-54. EDN YZFJET
10. Estimating parameters for traffic flow using navigation data on vehicles / M. Burinskienė, D. Kapski, V. Kasyanik et al. // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. – 2020. – Vol. 15, No. 4. – P. 1–21. DOI 10.7250/bjrbe.2020-15.492. EDN HJJOQX
11. Зедгенизов А.В., Капский Д.В., Лагереv Р.Ю. Оценка влияния объектов капитального строительства на прилегающую улично-дорожную сеть при организации дорожного движения посредством регулируемых пересечений // Наука и техника. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 506–513. DOI 10.21122/2227-1031-2021-20-6-506-513. EDN DIPKOD
12. Метод определения достаточности сети автомобильных дорог региона / П.А. Пегин, Д.В. Капский, А.А. Ильин и др. // Наука и техника. – 2023. – Т. 22, № 4. – С. 301–307. DOI 10.21122/2227-1031-2023-22-4-301-307. EDN ZDDAHQ
13. Бульгичева Н.В., Капский Д.В., Лосин Л.А. Исследование влияния параметров транспортной модели на результаты расчетов пассажиропотоков (на примере Санкт-Петербурга) // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук. – 2023. – Т. 59, № 3. – С. 253–264. DOI 10.29235/1561-2430-2023-59-3-253-264. EDN QLMSR

14. Wardrop J. G., Whitehead J. I. Correspondence. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. – 1952. – № 1(5). – P. 767–768.
15. Врубель Ю.А., Капский Д.В., Кот Е.Н. Определение потерь в дорожном движении. – Минск: БНТУ, 2006. – 240 с.

Поступила 30.03.2026

FORECASTING THE REDISTRIBUTION OF TRAFFIC FLOWS UNDER INCIDENT CONDITIONS ON AN URBAN ROAD NETWORK

*I. URBANOVICH¹, V. IVANOV², A. KORZOVA³,
G. KUCHARONAK¹, D. MOZALEVSKI³*

(¹Belarusian National Technical University, Minsk;

²Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk;

³Branch of BNTU "Research Polytechnic Institute", Minsk)

The article is devoted to the urgent problem of reducing the negative consequences of incidents on the urban road network. The problem of forecasting the redistribution of traffic flows arising from unforeseen traffic blockages is considered. The aim of the research is to develop a software package capable of simulating the development of the traffic situation in near-real-time and providing a forecast for making operational management decisions. To achieve this goal, an analysis of existing approaches to traffic demand modeling was carried out, based on which the method of dynamic non-equilibrium assignment was chosen as the one that most adequately describes driver behavior under incident conditions. The SUMO simulation micro-modeling environment was used as an instrumental platform. A simulation model of a representative section of the Minsk road network was developed and calibrated, with an error in traffic intensity at key intersections not exceeding 5%. A software package was created, consisting of a simulation model control module (in Python using the TraCI API) and a graphical user interface module (based on the PyQt5 library). An experimental study showed that using the developed package for forecasting and preventive changes in traffic signal control modes can reduce average transport delays in the incident zone by 21%. The estimated annual economic effect from the implementation of the proposed solution is 31,283 conventional units, with a payback period for capital investments of 1.85 years.

Keywords: *traffic modeling, traffic flow redistribution, traffic incident, simulation model, SUMO, forecasting, intelligent transport systems, traffic optimization.*

ОБОСНОВАНИЕ МЕСТ УСТАНОВКИ ДАТЧИКОВ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

В.А. ЗЕНЬКОВ

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Обоснован выбор мест установки и ориентации виброакустических датчиков на блоке цилиндров двигателя внутреннего сгорания при определении технического состояния цилиндропоршневой группы и шатунных и коренных подшипников коленчатого вала на основе выбора диагностически информативных зон поверхности двигателя, обеспечивающих максимальную чувствительность статистических характеристик вибросигнала к изменению структурных параметров диагностируемых соединений. Предложенное решение позволяет перейти от эмпирического выбора точек измерения к формализованной процедуре построения измерительной схемы, пригодной для последующего установления количественных зависимостей между степенью износа сопряжений и параметрами виброакустического сигнала.

Ключевые слова *двигатель внутреннего сгорания, техническое состояние, виброакустическая диагностика, датчик виброускорения, диагностически информативная зона, блок цилиндров, цилиндропоршневая группа, коренные подшипники, шатунные подшипники.*

Введение. Диагностирование двигателей внутреннего сгорания в системе технической эксплуатации автомобилей относится к числу ключевых направлений повышения их надежности, безопасности и экономичности. В условиях перехода от регламентного обслуживания к обслуживанию по фактическому состоянию возрастает значение методов контроля, позволяющих выявлять развивающиеся повреждения без разборки агрегата и без вывода его из использования по назначению¹ [1; 2].

Виброакустический метод рассматривается как один из наиболее перспективных для безразборной оценки технического состояния двигателя, выявления начальных стадий дефектообразования и последующего перехода к оценке остаточного ресурса узлов^{2,3}[1; 2; 11]. Вибрационный мониторинг машин показывают, что статистические характеристики временного сигнала, спектральные показатели и параметры огибающей сохраняют высокую диагностическую значимость при условии корректной организации измерительного процесса и устойчивой связи между местом регистрации и источником возбуждения³ [1; 2].

Вместе с тем в прикладных исследованиях по двигателям внутреннего сгорания основное внимание часто уделяется алгоритмам обработки сигнала, распознаванию дефектов и построению классификаторов, тогда как выбор места установки датчика нередко определяется конструктивной доступностью, удобством монтажа либо общими рекомендациями по виброизмерениям. Такой способ размещения не приемлем для задач локализации дефектов цилиндропоршневой группы и подшипниковых узлов, поскольку регистрируемый на поверхности блока сигнал представляет собой суперпозицию колебаний от нескольких источников, проходящую через участки конструкции с различной жесткостью, демпфированием и направленностью колебательного движения⁴ [3–5].

Целью работы являлся выбор мест, наиболее чувствительных к изменению технического состояния основных трущихся соединений, способа установки виброакустических датчиков и их ориентации при диагностировании двигателя внутреннего сгорания.

Методы исследования. Методическая основа работы опирается на положения вибрационного мониторинга машин, согласно которым информативность диагностирования определяется качеством измерения, корректностью предварительной обработки сигнала, выбором признаков и устойчивостью связи между диагностическим и структурным параметрами [1; 2].

Выбор диагностически информативных зон выполнялся по совокупности критериев: амплитудной чувствительности сигнала к дефекту, диагностической контрастности между исправным и неисправным состояниями агрегата, селективности по отношению к исследуемому узлу, повторяемости результатов и технологиче-

¹ ГОСТ Р ИСО 13373-1:2002. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 1. Общие методы. – М., 2010. – 42 с.

² ГОСТ Р ИСО 8528-9:202. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Ч. 9. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния. – М., 2021. – 12 с.

³ ГОСТ Р ИСО 13373-2:2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. – М., 2010. – 20 с.

⁴ Analog Devices. ADXL345: Data Sheet. Rev. G. – 2022. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf> (дата обращения: 28.03.2026).

ской пригодности точки установки. В качестве обобщенного критерия рациональности размещения датчика использована зависящая от координат точки крепления и угла ориентации чувствительной оси функция:

$$J(x, y, z, \varphi) \rightarrow \max.$$

Обобщенный критерий рациональности размещения датчика может быть представлен как функция нескольких частных показателей:

$$J(x, y, z, \varphi) = w_1 K_d(x, y, z, \varphi) + w_2 K_{sep}(x, y, z, \varphi) - w_3 V(x, y, z, \varphi) + w_4 P_{diag}(x, y, z, \varphi), \quad (1)$$

где $J(x, y, z, \varphi)$ – обобщенный критерий рациональности размещения виброакустического датчика;

x, y, z – координаты точки крепления датчика на поверхности корпусной детали;

φ – угол ориентации чувствительной оси датчика;

$K_d(x, y, z, \varphi)$ – коэффициент диагностической чувствительности в выбранной точке и при выбранной ориентации;

$K_{sep}(x, y, z, \varphi)$ – коэффициент различимости исправного и дефектного состояний;

$V(x, y, z, \varphi)$ – коэффициент вариации регистрируемых параметров;

$P_{diag}(x, y, z, \varphi)$ – достоверность диагностической оценки;

w_1, w_2, w_3, w_4 – весовые коэффициенты, отражающие значимость соответствующих показателей.

Знак минус перед V введен потому, что увеличение вариации ухудшает качество диагностического измерения, тогда как увеличение K_d , K_{sep} и P_{diag} , наоборот, повышает рациональность выбора точки установки и ориентации датчика. При этом измеряемое датчиком виброускорение рассматривается как проекция вектора ускорения колебаний точки корпуса на направление чувствительной оси датчика:

$$a_m(t) = a(t) \cdot n, \quad (2)$$

где $a_m(t)$ – измеряемое датчиком мгновенное значение виброускорения в момент времени t ;

$a(t)$ – вектор полного ускорения колебаний точки конструкции, в которой установлен датчик, в момент времени t ;

n – единичный вектор направления чувствительной оси датчика.

Из выражения следует, что датчик регистрирует не полный вектор ускорения колебаний, а лишь его составляющую вдоль собственной чувствительной оси. Поэтому при совпадении направления вектора $a(t)$ с направлением n измеряемый сигнал достигает максимального значения, а при отклонении оси датчика на угол φ величина измеряемого ускорения уменьшается пропорционально $\cos\varphi$. Тогда можно записать и эквивалентную форму:

$$am(t) = |a(t)| \cos\varphi.$$

Основная часть. Для двигателя внутреннего сгорания источником колебаний являются переменные газовые силы, инерционные нагрузки, ударные взаимодействия в сопряжениях, пульсации рабочих сред и вибрации деталей двигателя, возникающие в процессе его работы: вклад в общий сигнал вносят цилиндропоршневая группа, шатунные и коренные подшипники, газораспределительный механизм, а также вспомогательные агрегаты⁵ [2].

Диагностически информативные зоны установки датчиков целесообразно определять по совокупности критериев, которыми являются:

- чувствительность как способность регистрируемого в данной зоне вибросигнала заметно изменяться при изменении технического состояния исследуемого узла;
- контрастности, характеризующая степень преимущественного влияния контролируемого узла на параметры сигнала по сравнению с другими источниками колебаний;
- воспроизводимость измерений в виде устойчивости значений диагностических признаков при многократной регистрации сигнала в одинаковых условиях;
- помехоустойчивость, отражающая минимальную зависимость результата от внешних воздействий, нестабильности режима работы двигателя и особенностей крепления датчика;
- конструктивно-технологическая пригодность, включая возможность жесткого крепления датчика со стабильным контактом и повторяемого позиционирования измерительного средства.

Интегральный показатель информативности I_j -й диагностируемой зоны

$$I_j = \omega_1 K_{a,j} + \omega_2 K_{d,j} + \omega_3 K_{s,j} + \omega_4 K_{r,j} + \omega_5 K_{t,j}, \quad (3)$$

где $K_{a,j}$ – показатель амплитудной чувствительности;

$K_{d,j}$ – показатель диагностической контрастности;

$K_{s,j}$ – показатель воспроизводимости;

$K_{r,j}$ – показатель помехоустойчивости;

⁵ ГОСТ Р ИСО 13373-2-2009. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 2. Обработка, анализ и представление результатов измерений вибрации. – М., 2010. – 20 с.

K_{ij} – показатель технологической пригодности;

$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$ – весовые коэффициенты, отражающие значимость соответствующих критериев.

При выборе датчика и способа его монтажа учитывались рекомендации изготовителя Analog Devices и общие требования к установке акселерометров. Рекомендуемая схема крепления датчика ADXL345, выполненного в виде модуля GY-291, приведена на рисунке 1. Для MEMS-акселерометра ADXL345 характерны трехосевая измерительная схема (рисунок 2), диапазон измерений ускорения до $\pm 16g$, поддержка частоты дискретизации до 3200 Гц и цифровой интерфейс SPI/I²C, что делает его пригодным для сравнительных диагностических исследований низко- и среднечастотных вибраций⁶. Вместе с тем нормативные и прикладные источники подчеркивают, что способ крепления акселерометра является одним из критических факторов точности измерений: предпочтительным является резьбовое крепление на ровную и жесткую поверхность, а мягкое крепление и паразитные нагрузки от кабеля способны исказить спектральный состав сигнала и снижать полезный частотный диапазон [3–6].

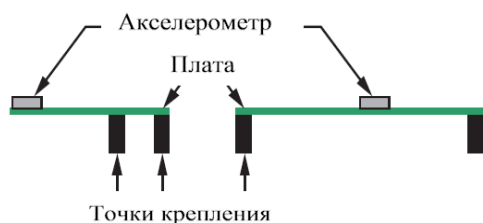


Рисунок 1. – Схема крепления датчика ADXL345

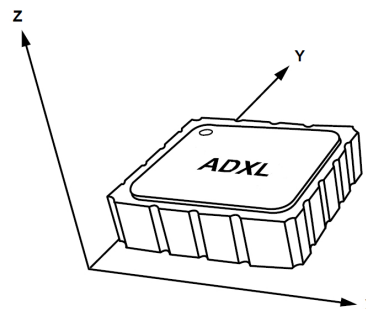


Рисунок 2. – Ориентация осей чувствительности датчика ADXL345

Учитывались требования к процедурам сбора данных и сопоставимости измерений. Согласно ГОСТ Р ИСО 13373-1, достоверность мониторинга определяется согласованностью измерительных процедур, стабильностью режимов и повторяемостью положения датчика⁷. При анализе вибраций контролируемых агрегатов важны также рекомендации ГОСТ Р ИСО 8528-9 по измерительным точкам и оценке внешних механических вибраций при различных типах опор и креплений⁸.

Для диагностирования цилиндропоршневой группы наиболее информативными являются зоны, расположенные вблизи верхней части цилиндров и воспринимающие ударно-импульсные процессы, возникающие при перекладке поршня. К таким зонам относятся головка блока цилиндров над диагностируемым цилиндром и боковые участки блока цилиндров на уровне верхней мертвой точки поршня. Такой вывод согласуется с данными о высокой информативности сигналов, снимаемых с цилиндрической головки и жестких участков блока при анализе процессов сгорания и механических воздействий [5].

Для шатунных подшипников рациональными являются участки картера двигателя или масляного поддона в проекции шатунной шейки. В этих зонах ожидается наиболее отчетливое проявление ударных импульсов, возникающих при изменении зазора и передаче нагрузки в верхней и нижней мертвых точках. Для коренных подшипников предпочтительными являются опорные площадки картера двигателя непосредственно под коренными опорами и торцовая часть блока цилиндров в зоне переднего или заднего коренного подшипника, где лучше регистрируются как радиальные, так и осевые составляющие колебаний коленчатого вала [7].

Выбор места установки датчика должен сочетаться с корректной ориентацией его осей чувствительности. Для контроля поршневой группы наибольший интерес представляют вертикальная и поперечная компоненты, регистрирующие инерционные и боковые удары, тогда как для коренных подшипников дополнительно возрастает значение продольной компоненты, совпадающей с осью коленчатого вала. Результаты исследований подтверждают, что диагностическая точность существенно зависит от положения датчика на двигателе; при неудачном расположении возрастает фоновая составляющая и снижается различимость состояний.

С учетом требований к воспроизводимости результатов для исследовательской установки предложено резьбовое крепление датчиков с жесткой фиксацией платы на переходную пластину (рисунки 3, 4) и крепление с помощью эпоксидного двухкомпонентного клея (рисунок 5). Также предусматривалась отдельная фиксация проводников, исключающей передачу паразитных механических воздействий на область расположения чув-

⁶ Analog Devices. ADXL345: Data Sheet. Rev. G. – 2022. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf> (дата обращения: 28.03.2026).

⁷ ГОСТ Р ИСО 13373-1:2002. Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Ч. 1. Общие методы. – М., 2010. – 42 с.

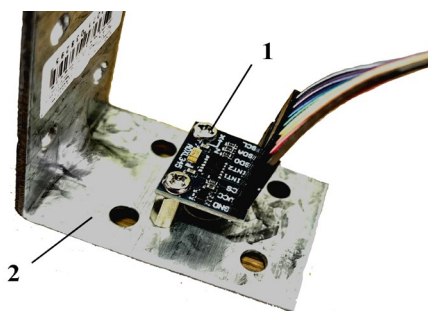
⁸ ГОСТ Р ИСО 8528-9-202. Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Ч. 9. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния. – М., 2021. – 12 с.

ствительного элемента. Такая схема (таблица) отвечает рекомендациям изготовителя и общим правилам виброизмерений⁹ [6].

Таблица. – Рекомендуемые зоны установки датчиков и ориентация их осей

Диагностируемый узел	Диагностически информативная зона	Предпочтительная ориентация осей	Ожидаемый диагностический эффект
Цилиндропоршневая группа	ГБЦ над диагностируемым цилиндром; боковая стенка блока на уровне ВМТ	вертикальная, поперечная	Регистрация ударов при переключке поршня и роста радиальных вибраций
Шатунные подшипники	Картер или поддон в проекции шатунной шейки	вертикальная, поперечная	Выделение импульсов передачи нагрузки в ВМТ и НМТ
Коренные подшипники	Опорные площадки картера под коренными опорами; торцевая часть блока	вертикальная, продольная	Контроль вибраций на частотах вращения и гармониках, а также осевых колебаний

Пространственная ориентация датчиков выбиралась по критерию расположения чувствительных осей датчика параллельно и ортогонально оси пар трения диагностируемого узла. Например, для коленчатого вала за базовую ось принималась ось вращения коленчатого вала. Ось *X* датчика устанавливается параллельно оси для коленчатого вала (продольное направление), ось *Y* датчика – ортогонально оси коленчатого вала в горизонтальной плоскости (горизонтальное направление), ось *Z* датчика – ортогонально оси коленчатого вала в вертикальной плоскости (вертикальное направление). Подобным образом ориентировались датчики для контроля цилиндропоршневой группы. Базовой осью в данном случае являлись оси цилиндров. Рациональность размещения подтверждалась изменением уровня регистрируемого сигнала при смещении и изменении угла наклона чувствительных осей (рисунки 5–7).



1 – датчик, 2 – переходная пластина

Рисунок 3. – Способ крепления датчика ADXL345 к переходной пластине

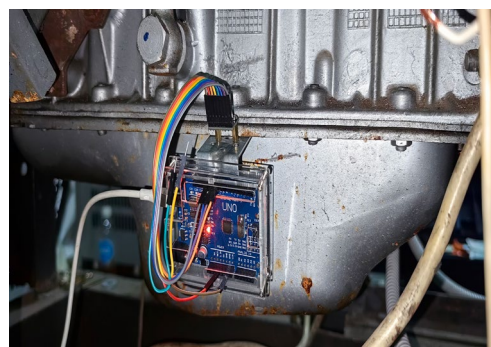
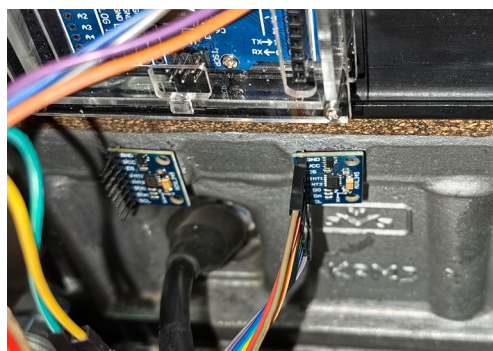
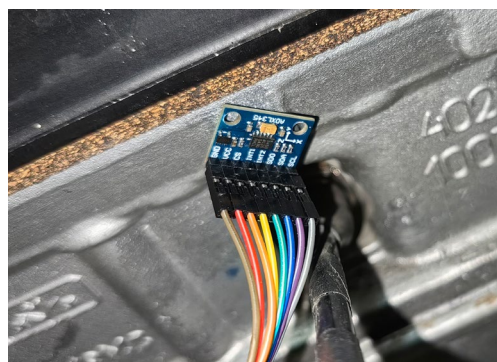


Рисунок 4. – Размещение датчика под 3-й коренной опорой через переходную пластину



а

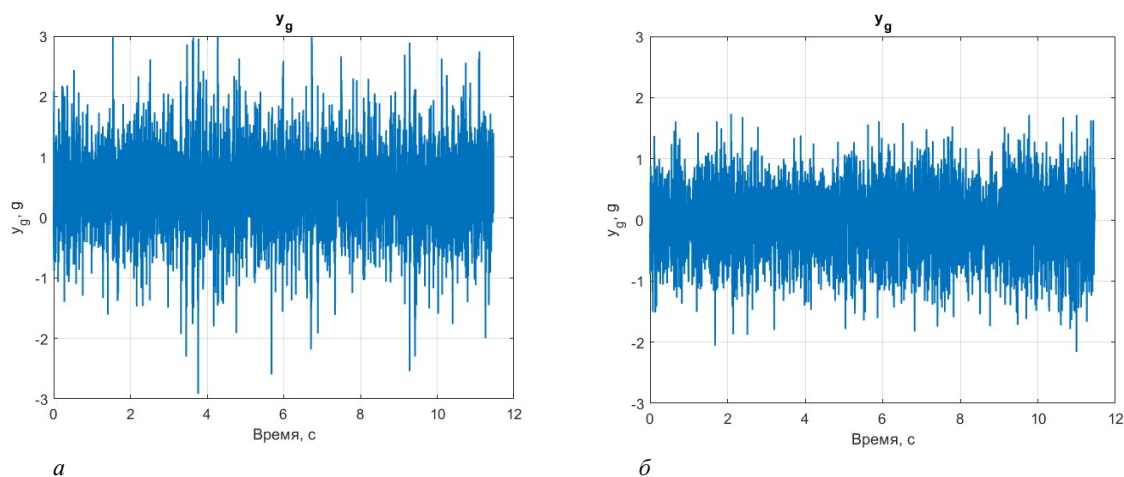


б

а – со смещением относительно проекции оси цилиндра; б – с изменением. Крепление с помощью эпоксидного клея

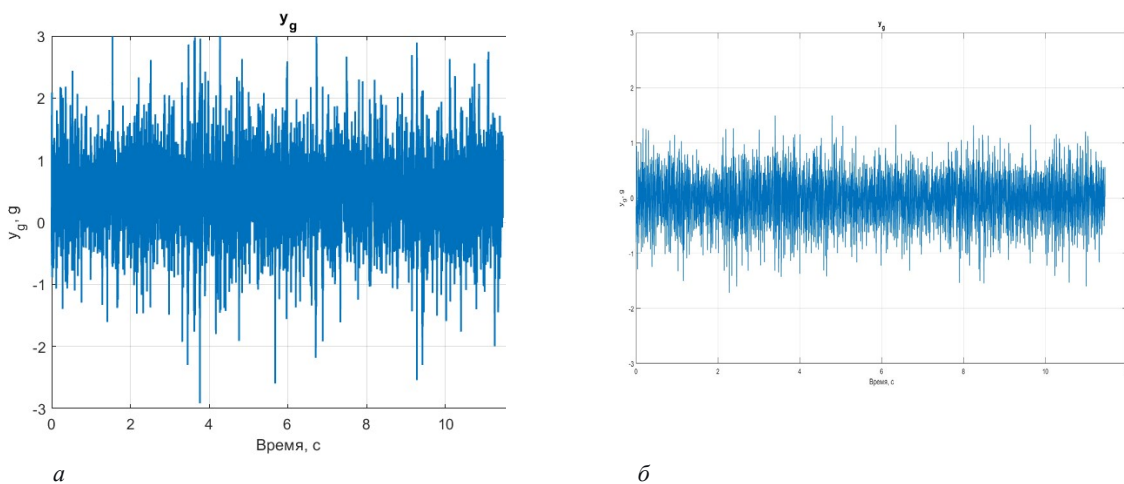
Рисунок 5. – Размещение датчика ADXL345 на блоке цилиндров

⁹ Analog Devices. ADXL345: Data Sheet. Rev. G. – 2022. – URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf> (дата обращения: 28.03.2026).



a – датчик в корректно выбранной точке; *б* – датчик смещен на 50 мм по горизонту

Рисунок 6. – Изменение сигнала при смещении датчика относительно оси цилиндра



a – оси чувствительности датчика ориентированы корректно;
б – продольная ось X и вертикальная ось Y отклонены на угол $\alpha = 45^\circ$

Рисунок 7. – Изменение сигнала датчика при изменении угла наклона осей чувствительности

Предлагаемая схема размещения датчиков позволяет пространственно разделить источники колебаний, снизить перекрестное влияние различных узлов и подготовить экспериментальную базу для установления корреляций между степенью износа сопряжений и статистическими характеристиками сигнала (RMS, Peak, Crest factor, Kurtosis, EnvRMS). Для обработки сигнала датчика использовалась связка микроконтроллерной платы Arduino Uno и персонального компьютера (ПК). Для Arduino Uno в среде Arduino IDE, с использованием стандартных библиотек, был написан скрипт работы с ADXL345. Для ПК в среде Visual Studio Code был написан программный модуль конвертации потоковых данных от датчика в файл формата csv. Дальнейшая обработка и визуализация производились средствами пакета Matlab.

Заключение. Проведенное обоснование показывает, что выбор мест установки виброакустических датчиков при диагностировании двигателя внутреннего сгорания должен опираться на анализ диагностически информативных зон, а не только на конструктивную доступность поверхности. Наиболее информативными для контроля цилиндропоршневой группы являются зоны вблизи цилиндров и головки блока, для контроля шатунных подшипников – участки картера или поддона в проекции шатунных шеек, а для коренных опор – опорные площадки картера и торцевая часть блока цилиндров.

Практическая значимость работы состоит в формировании воспроизводимой схемы размещения датчиков для исследовательской установки с использованием акселерометров ADXL345. Предложенное решение обосновывает выбор точек измерения, создает условия для получения пространственно-разнесенной диагностической информации и может быть использовано при разработке экспериментальных методик оценки технического состояния и остаточного ресурса двигателей. Научная значимость состоит в переходе от эмпирического выбора мест установки датчиков к критериальному, учитывающему чувствительность, контрастность, воспро-

изводимость, помехоустойчивость и технологическую реализуемость. Это позволяет рассматривать структуру измерительной схемы как составную часть способа виброакустического диагностирования двигателя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин: учеб. пособие. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 360 с.
2. A Review on Vibration Monitoring Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery / M. Romanssini, P. C. C. de Aguirre, L. Compassi-Severo et al. // Eng. – 2023. – Vol. 4, No. 3. – P. 1797–1817. DOI: 10.3390/eng4030102
3. Nithin S. K., Hemanth K., Shamanth V. A review on combustion and vibration condition monitoring of IC engine // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 45, Part 1. P. 65–70. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214785320376719> (дата обращения: 28.03.2026).
4. Hassan I. U., Panduru K., Walsh J. An In-Depth Study of Vibration Sensors for Condition Monitoring // Sensors. – 2024. – Vol. 24, No. 3. – Art. 740. DOI: 10.3390/s24030740
5. Combustion and Resilient Mounting Condition Diagnostics thru Structural Vibration Monitoring of a Diesel Generator Set / R. D. Barro, D. C. Lee, S. M. Son et al. // Asia Pacific Conference of the Prognostics and Health Management Society. – 2017. – URL: <https://papers.phmsociety.org/index.php/phmap/article/view/1780> (дата обращения: 28.03.2026).
6. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ. Вибрации. – СПб.: СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
7. Moosavian A., Ahmadi H., Tabatabaefar A. Fault diagnosis of main engine journal bearing based on vibration analysis using Fisher linear discriminant, K-nearest neighbor and support vector machine // Journal of Vibroengineering. – 2012. – Vol. 14, Iss. 2. – P. 894–906. – URL: <https://www.extrica.com/article/10645/pdf> (дата обращения: 28.03.2026).

Поступила 01.04.2026

**RATIONALE FOR SELECTING SENSOR INSTALLATION LOCATIONS
FOR VIBROACOUSTIC DIAGNOSTICS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES**

V. ZENKOV

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The selection of installation locations and orientation of vibroacoustic sensors on the cylinder block of an internal combustion engine for determining the technical condition of the cylinder-piston group and the connecting-rod and main bearings of the crankshaft is substantiated on the basis of identifying diagnostically informative zones on the engine surface that ensure maximum sensitivity of the statistical characteristics of the vibration signal to changes in the structural parameters of the diagnosed joints. The proposed solution makes it possible to move from an empirical choice of measurement points to a formalized procedure for constructing a measurement scheme suitable for the subsequent establishment of quantitative relationships between the degree of wear of mating parts and the parameters of the vibroacoustic signal.

Keywords: *internal combustion engine, technical condition, vibroacoustic diagnostics, vibration acceleration sensor, diagnostically informative zone, cylinder block, cylinder-piston group, main bearings, connecting-rod bearings.*

УДК 656.135.2(476.2)

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-40-51

**МУЛЬТИМАРШРУТНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ
РАБОТЫ МАРШРУТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ
С УЧЕТОМ МНОГОДЕПОВОСТИ И РЕЖИМОВ ТРУДА И ОТДЫХА ВОДИТЕЛЕЙ**

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

Усовершенствована математическая модель планирования работы маршрутных транспортных средств на городской сети. Все ездки за сутки представлены вершинами ориентированного графа, а возможные переходы между ездками – дугами с расчетом длительностей ожидания и порожних перегонов. Построение множества допустимых цепей графа интерпретировано как возможные варианты выполнения ездов одним транспортным средством в течение смены. Учтены многодеповость и режим труда и отдыха водителей. Многодеповость реализована через введение первых и вторых нулевых ездов и требование замкнутости цепей по месту постоянной дислокации. Ограничения по режиму труда и отдыха предусмотрены за счет предварительной проверки цепей на соответствие нормативным требованиям по длительности смены, суммарному и непрерывному времени работы, а также предоставлению перерывов для отдыха и питания. Математическая модель обеспечивает рациональный план работы, минимизирующий приведенные затраты времени, а следовательно, и себестоимость транспортной работы. Практическая значимость результатов заключается в создании теоретической основы для принятия решений при суточном планировании и диспетчерском управлении маршрутными транспортными средствами в условиях сложной маршрутной сети.

Ключевые слова: *пассажиропоток, маршрутное транспортное средство, мультимаршрутное планирование, оптимизация, режим труда и отдыха, многодеповость.*

Вопросам повышения эффективности работы МТС посвящено достаточно много научных трудов. Обзор основных из них дан в [1, с. 40–43]. Их анализ показал наличие ряда существенных недостатков, которые было предложено решить формализацией мультимаршрутного метода организации работы МТС [1, с. 43–51; 2; 3]. При этом следует отметить, что приведенное в [1, с. 40–43] описание мультимаршрутного метода организации работы МТС не учитывает ряд практических аспектов функционирования ГПТРС. Так, в постановке задачи [1, рисунок 2] не учтено возможное наличие нескольких депо. Также ограничения по режиму труда и отдыха носят в основном декларативный характер [1, формула (20)] и не отражают многообразия требований к режиму труда и отдыха водителей, сформулированному в постановлении¹. Учет этих ограничений – *основная цель данной статьи.*

При написании статьи использовались методы анализа и обобщения литературных источников, положения теории графов, формализация и математическая постановка целевой функции и ограничений.

Для описания и формализации мультимаршрутного метода использованы следующие условные обозначения:

Множества:

PPD – множество мест постоянной дислокации (МПД) МТС, $PPD = \{p_1, p_2, \dots, p_{PPD}\}$

V – множество вершин графа (всех ездов);

$V1$ – множество возможных первых нулевых ездов;

$V2$ – множество ездов с пассажирами;

$V3$ – множество возможных вторых нулевых ездов;

$V = V1 \cup V2 \cup V3$. $|V1|=|V3|=|PPD| \cdot |V2|$;

$V(P_a) \subseteq V$ – множество вершин, входящих в цепь P_a ;

D – множество дуг графа (вариантов перехода между ездками МТС);

$D^+(v) = \{d(v,u) \in D \mid u \in V, d(v,u) \text{ существует}\}$ – множество дуг, исходящих из вершины v ;

$D^-(v) = \{d(u,v) \in D \mid u \in V, d(u,v) \text{ существует}\}$ – множество дуг, входящих в v ;

$D(P_a) \subseteq D$ – множество дуг, входящих в цепь P_a ;

A – атрибуты вершин графа;

B – атрибуты дуг графа;

M – множество рассматриваемых маршрутов работы МТС;

¹ Об утверждении Положения о рабочем времени и времени отдыха водителей автомобилей, троллейбусов и трамваев: постановление Министерства транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь от 9 янв. 2025 г. № 1 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22543017> (дата обращения 03.01.2026).

H – множество начальных пунктов рассматриваемой маршрутной сети и МПД МТС ($PPD \subseteq H$);

K – множество конечных пунктов рассматриваемой маршрутной сети и МПД МТС ($PPD \subseteq K$);

T – множество МТС;

P – множество рассматриваемых простых цепей графа G .

Переменные:

i, e, a – индексы;

v, u – вершины графа;

d – дуга графа;

m – номер маршрута работы МТС;

t_n – время начала ездки (отправления с начального пункта маршрута);

t_k – время окончания ездки (прибытия на конечный пункт маршрута);

L – расстояние, км;

P_v – пассажиронапряженность (максимальная загрузка) при выполнении ездки $v \in V2$, пасс.;

$\gamma_{a,e}$ – максимально допустимый по условиям комфорта пассажиров коэффициент пассажиронапряженности, используемый в ограничении по формуле (15). Фактический коэффициент пассажиронапряженности для назначенной пары «цепь–МТС» является производной величиной и вычисляется после оптимизации:

$$\gamma_{a,e} = \frac{P_a^{\max}}{C_e} \text{ при } y_{a,e} = 1.$$

Здесь $P_a^{\max} = \max \{P_v : v \in V2, \delta_{a,v} = 1\}$;

v_3 – эксплуатационная скорость движения МТС между начальными (конечными) пунктами маршрутов с учетом остановок на промежуточных остановочных пунктах $v_3 = 20$ км/ч;

v_t – техническая скорость движения МТС между начальными (конечными) пунктами маршрутов без остановок на промежуточных остановочных пунктах $v_t = 30$ км/ч;

t_3 – время запаса. Рассчитывается как разница во времени отправления МТС с начального пункта и временем его прибытия в этот начальный пункт ($t_3 = 6$ мин);

t_e – МТС с индексом (номером) $e, e = 1, \dots, |T|$;

C_e – вместимость МТС t_e , пассажиров. $p_e \in PPD$ – место постоянной дислокации (МПД) транспортного средства t_e (входные данные);

k – количество дуг в цепи P графа G ;

$S_{км}$ – себестоимость 1 км пробега МТС, руб / км;

$S_ч$ – себестоимость 1 ч простоя МТС, руб / ч;

$K_{пре}$ – коэффициент приведения себестоимости часа простоя МТС t_e пассажировместимостью C_e к себестоимости 1 ч движения (пробега);

$T_{см}^{\max}$ – максимально допустимая продолжительность ежедневной работы (смены) водителя, мин ($T_{см}^{\max} = 720$ мин);

$T_{упр}^{\max}$ – максимально допустимое время управления транспортным средством в течение смены, мин ($T_{упр}^{\max} = 600$ мин);

$T_{упр,непр}^{\max}$ – максимально допустимое непрерывное управление МТС без дополнительного специального перерыва, мин ($T_{упр,непр}^{\max} = 120$ мин);

$t_{сп}^{\min}$ – минимальная продолжительность дополнительного специального перерыва для отдыха от управления ТС, мин ($t_{сп}^{\min} = 10$ мин); перерыв включается в рабочее время;

$t_{пит}^{\min}, t_{пит}^{\max}$ – минимальная и максимальная продолжительность перерыва для отдыха и питания, мин ($t_{пит}^{\min} = 20$ мин, $t_{пит}^{\max} = 120$ мин; перерыв в рабочее время не включается);

$T_{пит}^{\sum \max}$ – максимально допустимая суммарная продолжительность перерывов для отдыха и питания при предоставлении двух перерывов, мин ($T_{пит}^{\sum \max} = 120$ мин);

$\Delta_{пит}$ – крайний срок предоставления перерыва для отдыха и питания от начала работы, мин ($\Delta_{пит} = 240$ мин);

$\Delta_{пит}^{см}$ – максимально допустимое смещение крайнего срока предоставления перерыва для отдыха и питания относительно $\Delta_{пит}$, мин; $\Delta_{пит}^{см} \geq 0$;

$t_{пит,a}$ – выбранная (засчитанная) длительность перерыва для отдыха и питания в цепи P_a , мин;

$\tau_{пит,a}$ – момент начала (первого) перерыва для отдыха и питания в цепи P_a , мин от начала суток;

$T_{упр,a}$ – суммарная продолжительность управления в цепи P_a , мин;

$T_{см,a}$ – длительность смены (рабочего дня) по цепи P_a , мин;

$T_{упр,непр,a}$ – накопленная непрерывная продолжительность управления по цепи P_a , мин;

η_a – параметр допустимости цепи P_a по условиям режима труда и отдыха водителей, сформулированным в постановлении². $\eta_a = 1$, если цепь удовлетворяет ограничениям по длительности смены, суммарной длительности управления, наличию (при необходимости) перерыва для отдыха и питания, а также ограничению на непрерывное управление с предоставлением дополнительного специального перерыва. Иначе $\eta_a = 0$.

Постановка задачи мультимаршрутного метода организации работы МТС с применением аппарата теории графов и с учетом многодеповости и режимов труда и отдыха водителей. Имеется непланарный, взвешенный, ориентированный, атрибутированный граф $G(V, D, A, B)$, где V – множество вершины графа, D – множество дуг графа, $A(v)$ – атрибуты вершины v , $B(d)$ – атрибуты дуги d (рисунок 1).

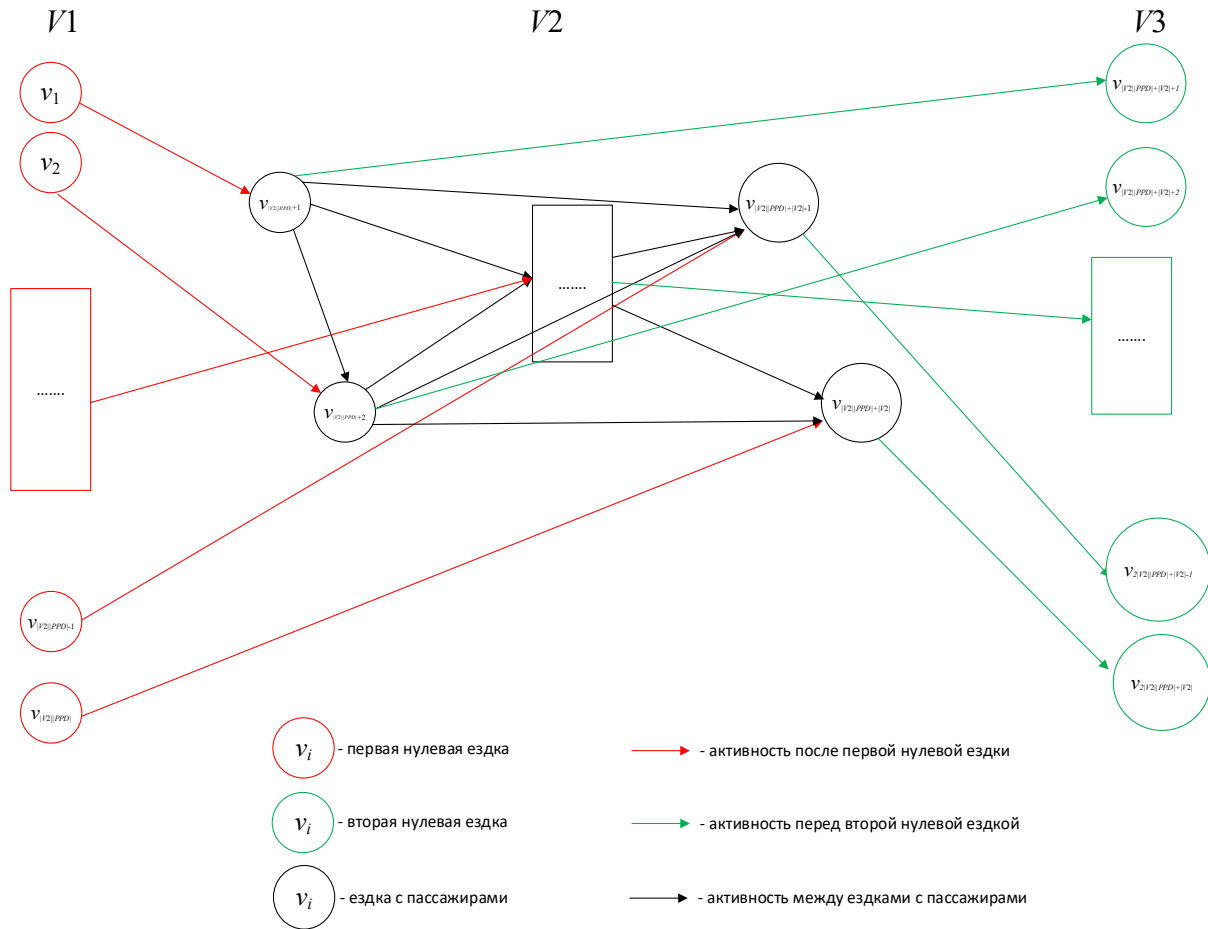


Рисунок 1. – Постановка задачи мультимаршрутного планирования

Каждая вершина представляет собой ездку. Совокупность вершин графа представляет собой совокупность упорядоченных по времени начала (слева направо на рисунке 1) всех ездок за день на всех маршрутах, в т.ч. нулевых ездок. Множество вершин V делится на три подмножества ($V = V1 \cup V2 \cup V3$):

- $V1 = \{v_1, v_2, \dots, v_{|I2|/PPD|}\}$ – множество возможных порожних ездок МТС с каждого МПД на каждый начальный пункт (первых нулевых ездок). Эти вершины являются истоками;
- $V2 = \{v_{|I2|/PPD|+1}, v_{|I2|/PPD|+2}, \dots, v_{|I2|/PPD|+|I2|}\}$ – множество ездок МТС с пассажирами по установленным регулярным маршрутам.
- $V3 = \{v_{|I2|/PPD|+|I2|+1}, v_{|I2|/PPD|+|I2|+2}, \dots, v_{|I2|/PPD|+|I2|+|I2|/PPD|}\}$ – множество возможных порожних ездок МТС с конечного пункта последней ездки до МПД (вторых нулевых ездок). Эти вершины являются стоками.

² Об утверждении Положения о рабочем времени и времени отдыха водителей автомобилей, троллейбусов и трамваев: постановление Министерства транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь от 9 янв. 2025 г. № 1 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22543017> (дата обращения 03.01.2026).

Множества $V1$ и $V3$ введены как технические: они не представляют собой самостоятельные рейсы, а задают соответственно возможные первые и последние нулевые ездки для каждой пассажирской ездки $u \in V2$ при многодеповости. Конкретная вершина из $V1$ (или $V3$) активируется только в том случае, если соответствующая пассажирская ездка u становится первой (или последней) в выбранной цепи P_a . Внутри цепи P_a нулевые ездки, соответствующие $V1$ и $V3$, могут появляться не более одного раза в каждой цепи – только как начало и конец цепи.

Количество вершин $V2$ равно количеству всех ездок за день на всех маршрутах $|V2|$. Количество вершин $V1$ равно количеству возможных вариантов первых нулевых ездок $|V1| = |V2| \cdot |PPD|$, а $V3$ – количеству возможных вариантов вторых нулевых ездок $|V3| = |V2| \cdot |PPD|$. При этом $|V1| = |V3|$.

Каждая вершина $v \in V$ ассоциирована с набором следующих атрибутов:

$$A(v) = \{i_v, m_v, H_v, K_v, t_{nv}, t_{kv}, \Pi_v\}, \tag{1}$$

где i_v – порядковый номер вершины v графа V (порядковый номер ездки v),

$$i_v \in \{1, \dots, |V|\}, |V| = |V1| + |V2| + |V3|;$$

m_v – номер маршрута, на котором выполняется ездка v , $m_v \in \{m_1, m_2, \dots, m_{|M|}\}$, где M – множество рассматриваемых маршрутов работы;

H_v – начальный пункт при выполнении ездки v ,

$$H_v = \text{МПД}, v \in V1; H_v \in (H - \text{МПД}), v \in V2; H_v \in (K - \text{МПД}), v \in V3,$$

здесь H – множество начальных пунктов рассматриваемой маршрутной сети; K – множество конечных пунктов рассматриваемой маршрутной сети;

K_v – конечный пункт при выполнении ездки v ,

$$K_v \in (H - \text{МПД}), v \in V1; K_v \in (K - \text{МПД}), v \in V2; K_v = \text{МПД}, v \in V3.$$

Множества H и K состоят из локаций маршрутной сети (остановочных пунктов и МПД) и могут пересекаться: один и тот же пункт может быть конечным для одной ездки и начальным для другой;

t_{nv} – время начала ездки v (ездки с номером i_v). Пассажирские ездки $V2$ нумеруются в соответствии с расписанием, поэтому для $\forall v, u \in V2 : i_v < i_u \Rightarrow t_{nv} \leq t_{nu}$. Для технических нулевых ездок $v \in V1 \cup V3$ индекс i_v используется как идентификатор и не трактуется как хронологический порядок;

t_{kv} – время окончания ездки v , т.е. время прибытия на конечный остановочный пункт K_v ;

Π_v – пассажиронапряженность (максимальная наполненность МТС) при выполнении ездки v .

Для каждой вершины $v \in V1$ существует единственная пассажирская ездка $u(v) \in V2$ и МПД $p(v) \in PPD$ такие, что $H_v = p(v)$, $K_v = H_{u(v)}$. Для каждой вершины $v \in V3$ существует единственная пассажирская ездка $u(v) \in V2$ и МПД $p(v) \in PPD$ такие, что $H_v = K_{u(v)}$, $K_v = p(v)$. Тогда время начала ездки v (время отправления от начального остановочного пункта H_v):

$$t_{nv} = \begin{cases} t_{nu(v)} - \left(\frac{60L_{p(v),H_{u(v)}}}{v_T} + t_3 \right), v \in V1 \\ t_{nv} \text{ определяется действующим расписанием движения, } v \in V2, \\ t_{ku(v)}, v \in V3 \end{cases} \tag{2}$$

где $L_{МПД, H_u}$ – расстояние между МПД и начальным пунктом ездки H_u , км. Для вторых нулевых ездок $v \in V3$ начальный пункт совпадает с конечным пунктом соответствующей пассажирской ездки $u(v) \in V2 : H_v = K_{u(v)}$, а конечный пункт $K_v = p(v) \in PPD$. Поэтому для $v \in V3$ используется расстояние между конечным пунктом пассажирской ездки $K_{u(v)}$ и МПД $p(v)$. Времена второй нулевой ездки задаются как $t_{nv} = t_{ku(v)}$,

$t_{kv} = t_{nv} + \frac{60L_{K_{u(v)}, p(v)}}{v_i}$. Это согласуется с тем, что после последней пассажирской ездки МТС следует в МПД активность на дуге $V2 \rightarrow V3$ отсутствует;

v_T – техническая скорость движения МТС между начальными (конечными) пунктами маршрутов без остановок на промежуточных остановочных пунктах, $v_T = 30$ км/ч;

t_3 – время запаса. Рассчитывается как разница во времени отправления МТС с начального пункта и временем его прибытия в этот начальный пункт ($t_3 = 6$ мин);

$L_{K_{u(v)}, p(v)}$ – расстояние между конечным пунктом ездки u и МПД p , км.

Время окончания ездки v (время прибытия на остановочный пункт K_v):

$$t_{kv} = \begin{cases} t_{nu(v)} - t_3, v \in V1 \\ t_{kv} \text{ определяется действующим расписанием движения, } v \in V2, \\ t_{nv} + \frac{60L_{K_u(v),P(v)}}{v_T}, v \in V3 \end{cases} \quad (3)$$

Пассажиронапряженность при выполнении ездки v :

$$\Pi_v = \begin{cases} 0, v \in (V1 \cup V3) \\ \Pi_v^{in}, v \in V2 \end{cases} \quad \Pi_v^{in} \geq 0 \quad (4)$$

Пассажиронапряженность Π_v используется в модели как входной параметр. Для нулевых ездок $v \in V1 \cup V3$ принимается $\Pi_v = 0$. Для пассажирских ездок $v \in V2$ значения Π_v^{in} задаются во входных данных (например, по результатам обследований пассажиропотоков или по утвержденным расчетным данным). Это обеспечивает однозначное вычисление $\max \Pi_a$ и корректную проверку ограничения вместимости согласно формуле (15).

Каждая дуга $d(v,u) \in D$ представляет собой оценку активности МТС между вершинами v и u (действий, которые необходимо совершить после ездки v , чтобы выполнить ездку u). Совокупность всех дуг $d(v, u)$ графа представляет собой следующие возможные комбинации активностей МТС между ездками:

1. При $v \in V1, u \in V2$ – активность МТС между нулевой ездкой и первой ездкой с пассажирами (см. рисунок 1, дуги красного цвета), т.е. активность после первой нулевой ездки. Такая активность заключается в простое на протяжении времени t_3 в ожидании начала ездки u . При этом каждая вершина v будет соединена дугой с лишь с одной вершиной u и только один раз, т.е. из каждой вершины v будет исходить одна дуга. В каждую вершину u будет входить $|PPD|$ дуг. Общее количество дуг между вершинами v и u будет равно $|V2| \cdot |PPD|$.

2. При $v \in V2, u \in V2$ – активность МТС между ездками с пассажирами по установленным маршрутам регулярного сообщения. Такая активность может заключаться:

– в ожидании начала ездки u после окончания выполнения ездки v (при $K_v = H_u, t_{kv} \leq t_{nu} - t_3$). При $t_{kv} > t_{nu} - t_3$ МТС после выполнения ездки v не успевает на ездку u и дуги $d(v, u)$ не существует;

– в порожнем пробеге МТС с конечного пункта K_v к начальному пункту H_u с возможным ожиданием начала ездки u после окончания выполнения ездки v (при $K_v \neq H_u, t_{kv} \leq t_{nu} - (60 L_{v,u}) / v_T - t_3$), где $L_{v,u}$ – расстояние между K_v и H_u , км. При $t_{kv} > t_{nu} - (60L_{v,u}) / v_T - t_3$ МТС после выполнения ездки v не успевает на ездку u и дуги $d(v, u)$ не существует. Количество дуг от каждой вершины v равно количеству ездок, на которые будет успевать МТС после окончания выполнения ездки v ($|D^+(v)| = |\{u \in V2 \mid i_v < i_u \wedge t_{kv} \leq t_{nu} - (60L_{v,u}) / v_T - t_3\}|$).

3. При $v \in V2, u \in V3$ – активность МТС между заключительной ездкой с пассажирами и порожней ездкой до МПД. Закончив выполнение последней ездки, МТС сразу следует в МПД, поэтому какая-либо активность в данном случае будет отсутствовать. Дуга $d(v, u)$ в данном случае будет показывать связь между последней ездкой с пассажирами и вторым нулевым пробегом. При этом из каждой вершины $v \in V2$ исходит $|PPD|$ дуг – по одной в вершины $u \in V3$, соответствующие возврату из ездки v в каждое МПД $p \in PPD$. В каждую вершину $u \in V3$ входит одна дуга (из соответствующей v). Общее количество дуг между вершинами v и u будет равно $|V2| \cdot |PPD|$.

Каждая дуга $d(v, u) \in D$ ассоциирована с упорядоченным набором (кортежем) атрибутов:

$$B(d(v, u)) = \{v, u, t_{ожд(v,u)}, t_{двд(v,u)}\}, \quad (5)$$

где v – вершина графа (ездки), из которой выходит дуга $d(v, u) \in D, v \in (V1 \cup V2)$;

u – вершина графа (ездки), в которую входит дуга $d(v, u) \in D, v \in (V2 \cup V3)$;

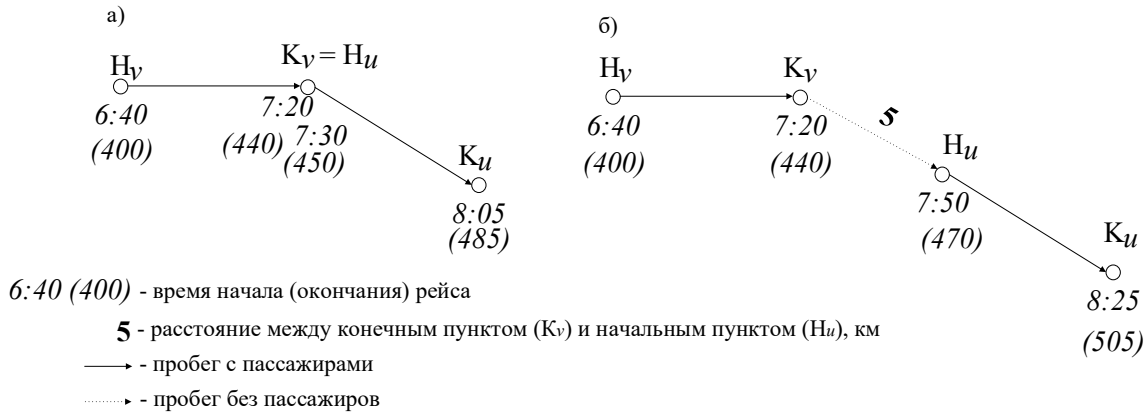
$t_{ожд(v,u)}$ – продолжительности активности, связанной с ожиданием начала ездки u после окончания выполнения ездки v , мин;

$t_{двд(v,u)}$ – продолжительности активности, связанной с порожним побегом из K_v и H_u , мин.

Длительность ожидания (неуправления) на дуге:

$$t_{ожд(v,u)} = \begin{cases} t_3, v \in V1, u \in V2, \\ t_{nu} - t_{kv} - t_{двд(v,u)}, v \in V2, u \in V2, d(v, u) \in D; \\ 0, v \in V2, u \in V3. \end{cases} \quad (6)$$

МТС выполняет езду между начальным остановочным пунктом H_v и конечным остановочным пунктом K_v , началом в 6:40 и окончанием в 7:20 (рисунок 2). При этом время берется от начала суток и 6:40 будет равно $6 \times 60 + 40 = 400$ мин, а 7:20 – 440 мин. Такая езда представлена вершиной v с атрибутами $A(v) = \{i_v, H_v - K_v, H_v, K_v, 400, 440, 34\}$.



а – в случае, когда конечный пункт ездки v совпадает с начальным пунктом ездки u ($K_v = H_u$);
б – в случае, когда $K_v \neq H_u$

Рисунок 2. – Расчет $t_{ожд(v,u)}$

Вторая езда может быть представлена атрибутами (см. выражение (2)):

1 $A(u) = \{i_u, "H_u - K_u", H_u, K_u, 450, 485, 16\}$ (см. рисунок 2, а);

2 $A(u) = \{i_u, "H_u - K_u", H_u, K_u, 470, 505, 20\}$ (см. рисунок 2, б).

В первом случае (см. рисунок 2, а) $K_v = H_u$: $t_{двд(v,u)} = 0$, тогда $t_{ожд(v,u)} = t_{ну} - t_{kv} = 450 - 440 = 10$ мин, условие существования дуги: $440 \leq 450 - 6$ выполнено ($t_{ож} = 10 > t_3 = 6$).

Во втором случае (см. рисунок 2, б) $K_v \neq H_u$, тогда $t_{ожд(v,u)} = t_{ну} - t_{kv} - \frac{60L_{v,u}}{v_t} = 470 - 440 - \frac{60 \cdot 5}{30} = 20$ мин.

В случаях, когда $t_{ожд(v,u)} < t_3$ МТС после выполнения ездки v не успевает на выполнение ездки u . Так, например, если бы порожний пробег из конечного пункта K_v в начальный пункт H_u был равен не 5, а 20 км (см. рисунок 2, б), то $t_{ожд(v,u)} = t_{ну} - t_{kv} - \frac{60L_{v,u}}{v_t} = 470 - 440 - \frac{60 \cdot 20}{30} = -10$. Т.е. после выполнения ездки v МТС не успеет выполнить ездку u .

$$t_{двд(v,u)} = \begin{cases} 0, v \in V1, u \in V2 \\ 0, K_v = H_u, d(v,u) \in D, v \in V2, u \in V2, i_v < i_u \text{ (рисунок 2,а)} \\ \frac{60L_{v,u}}{v_t}, K_v \neq H_u, d(v,u) \in D, v \in V2, u \in V2, i_v < i_u \text{ (рисунок 2,б)} \\ 0, v \in V2, u \in V3 \end{cases} \quad (7)$$

Параметр t_3 отражает минимальный запас времени между прибытием МТС в начальный пункт следующей ездки и ее отправлением и является частью интервала неуправления (простоя). Поэтому для переходов $V2 \rightarrow V2$ длительность ожидания на дуге $d(v,u)$ определяется как календарный интервал между окончанием ездки v и началом ездки u за вычетом времени порожнего пробега $t_{двд(v,u)}$: $t_{ожд(v,u)} = t_{ну} - t_{kv} - t_{двд(v,u)}$. Тогда условие существования дуги $t_{kv} + t_{двд(v,u)} \leq t_{ну} - t_3$ гарантирует $t_{ожд(v,u)} \geq t_3$. Для дуг $V1 \rightarrow V2$ ожидание равно t_3 (ожидание начала первой пассажирской ездки после завершения первой нулевой ездки), а для дуг $V2 \rightarrow V3$ ожидание отсутствует.

Дано также множество МТС, которые могут быть задействованы для выполнения ездок, изображенных на графе (см. рисунок 1):

$$T = \{t_1, t_2, \dots, |T|\} \quad (9)$$

где t_e – МТС с номером $e, e = 1, 2, \dots, |T|$. Для каждого МТС t_e известна его вместимость C_e .

Рассмотрим граф переходов $G(V,D)$ и множество рассматриваемых цепей P этого графа. Цепи нумеруются индексом $a = 1, \dots, |P|$, каждая цепь $P_a \in P$ задается $P_a = (v_{a,0}, d_{a,1}, v_{a,1}, d_{a,2}, v_{a,2}, \dots, d_{a,k_a}, v_{a,k_a})$, где k_a – количество дуг в цепи P_a ; $v_{a,0}, d_{a,1}, v_{a,1}, d_{a,2}, v_{a,2}, \dots, d_{a,k_a}, v_{a,k_a} \in V$ – последовательность вершин для цепи P_a , причем $v_{a,0} \in V1$, $v_{a,k_a} \in V3$, $v_{a,1}, v_{a,2}, \dots, v_{a,(k-1)_a} \in V2$; $d_{a,1}, d_{a,2}, \dots, d_{a,k_a} \in D$ – последовательность дуг графа G , вошедших в цепь P_a (последовательность ребер цепи P_a). Каждая цепь P_a показывает возможный вариант выполнения ездки (последовательность ездки и допустимых переходов между ними [рисунок 3]). Для каждой цепи P_a определим ее МПД как $p_a := H_{v_{a,0}}$, т.е. МПД отправления первой нулевой ездки. Поскольку рассматривается задача с учетом наличия многодеповости, МТС должно начать работу выездом из конкретного МПД $p \in PPD$ и завершить работу возвратом в тоже МПД. Требование замкнутости сменного задания по МПД (выезд и возврат в одно и то же МПД) учитывается в оптимизационной постановке ограничением согласно формуле (17). Для каждой цепи P_a вводится признак замкнутости $\zeta_a \in \{0,1\}$: $\zeta_a = 1$ тогда и только тогда, когда $H_{v_{a,0}} = K_{v_{a,k_a}}$; при $\zeta_a = 0$ ограничение (17) запрещает назначение МТС на такую цепь.

Необходимо выбрать набор (подмножество) цепей из P графа G , которое будет обеспечивать выполнение всех имеющихся ездки с минимальными затратами ресурсов на их осуществление.

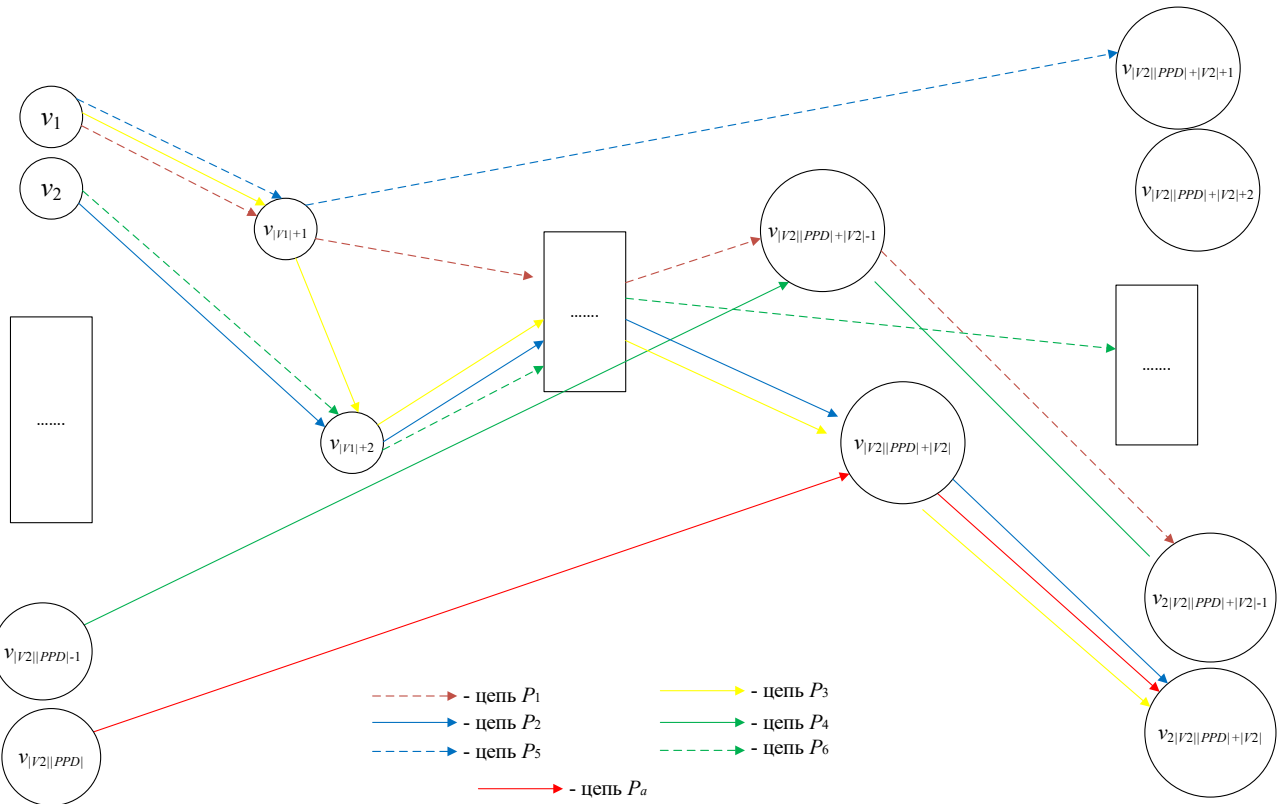


Рисунок 3. – Цепи графа

Обозначим через $D(P_a) \subseteq D$ множество дуг, входящих в цепь a (дуги, соединяющие последовательно выполняемые ездки). Для каждой цепи $P_a = (v_{a,0}, d_{a,1}, v_{a,1}, d_{a,2}, v_{a,2}, \dots, d_{a,k_a}, v_{a,k_a})$ определим две суммарные длительности (в минутах):

1) суммарная длительность движения по цепи a :

$$T_a^{дв} = \sum_{v \in V(P_a)} (t_{kv} - t_{nv}) + \sum_{d(v,u) \in D(P_a)} t_{двд(v,u)}$$

где $\sum_{v \in V} (t_{kv} - t_{nv})$ – время, учитывает длительность всех ездки, вошедших в цепь (включая нулевые ездки);

$\sum_{d(v,u) \in D(P_a)} t_{двд(v,u)}$ – учитывает возможные порожние пробеги между конечным пунктом одной ездки и начальным пунктом следующей ездки в случае, когда $K_v \neq H_u$.

2) суммарная длительность ожиданий между езками по цепи a :

$$T_a^{\text{ож}} = \sum_{d(v,u) \in D(P_a)} t_{\text{ож}d(v,u)} \cdot$$

Тогда «приведенная» длительность цепи для МТС t_e :

$$T_{a,e}^{\text{пр}} = T_a^{\text{дв}} + K_{\text{пре}} T_a^{\text{ож}},$$

где $K_{\text{пре}}$ – коэффициент приведения себестоимости часа простоя МТС t_e пассажироместимостью C_e к себестоимости часа его пробега. $K_{\text{пре}} = f(C_e)$;

Математическая модель. Введём бинарную переменную назначения цепи МТС: $y_{a,e} \in \{0,1\}$, $a = 1..|P|$, $e = 1..|T|$, где $y_{a,e} = 1$ означает, что цепь P_a выполняется МТС t_e вместимостью C_e , а $y_{a,e} = 0$ – в противном случае. Рассматриваемые цепи P_a нумеруются индексом a , где $a = 1, \dots, |P|$. В дальнейших ограничениях кванторы по цепям записываются как $\forall a = 1, \dots, |P|$, что соответствует «для всех рассматриваемых цепей $P_a \in P$ ».

Целевая функция в этом случае может выражать затрачиваемые на выполнение ездов приведенные место-часы транспортного предложения. Тогда она может быть записана следующим образом:

$$\frac{1}{60} \sum_{a=1}^{|P|} \sum_{e=1}^{|T|} C_e [T_a^{\text{дв}} + K_{\text{пре}} T_a^{\text{ож}}] y_{a,e} \rightarrow \min, \tag{10}$$

где 60 – переводной коэффициент из минут в часы.

В (10) минимизируются приведенные место-часы транспортного предложения, т.е. вместимость C_e умножается на приведенную длительность выполнения цепи $T_{a,e}^{\text{пр}} = T_a^{\text{дв}} + K_{\text{пре}} T_a^{\text{ож}}$. Коэффициент $K_{\text{пре}}$ является безразмерным и используется для перевода времени ожидания в эквивалент времени движения по себестоимости для МТС данной вместимости. Таким образом, критерий (10) не является прямой денежной целевой функцией (в рублях), но отражает экономически взвешенное транспортное предложение в единицах «место-часов», что исключает необходимость наличия и поддержания в актуальном состоянии большого объема информации о значениях составляющих себестоимости перевозки для каждого МТС. При необходимости денежная постановка может быть рассмотрена как отдельная модификация модели.

Для определения $K_{\text{пре}}$ взяты данные о зависимости переменной и постоянной составляющей себестоимости пассажирских перевозок от вместимости МТС, полученные описанным в [5, с. 13] способом:

$$S_{\text{км}} = 0,26 + 0,003C_e, \text{ руб/км}; S_{\text{ч}} = 8,15 + 0,03 C_e, \text{ руб/ч}.$$

Значение себестоимости 1 ч простоя было поделено на себестоимость 1 ч движения, где себестоимость 1 ч движения учитывает как постоянную (часовую) составляющую $S_{\text{ч}}$, так и переменную составляющую, пропорциональную пробегу за час $v_3 S_{\text{км}}$:

$$K_{\text{пре}} = \frac{S_{\text{ч}}}{v_3 S_{\text{км}} + S_{\text{ч}}} = \frac{8,15 + 0,03C_e}{v_3 (0,26 + 0,003C_e) + 8,15 + 0,03C_e}.$$

После подстановки принятого значения $v_3 = 20$ км/ч и упрощения выражения получаем:

$$K_{\text{пре}} = \frac{0,03C_e + 8,15}{0,09C_e + 13,35}. \tag{11}$$

Коэффициент $K_{\text{пре}}$ приводит время ожидания к эквивалентному по себестоимости времени движения:

$$K_{\text{пре}} = \frac{\text{стоимость одного часа ожидания для МТС } e}{\text{стоимость одного часа движения для МТС } e}.$$

Поэтому в цепи используется приведенная длительность $T_a^{\text{дв}} + K_{\text{пре}} T_a^{\text{ож}}$.

Множество цепей P формируется только из дуг $d(v,u) \in D$, получаемых только из пар (v, u) , $u \in V2$, удовлетворяющих условиям выполнимости:

$$i_v < i_u \text{ и } t_{\text{кв}} \leq t_{\text{ну}} - t_3 \text{ (если } K_v = H_u) \text{ либо } t_{\text{кв}} \leq t_{\text{ну}} - \frac{60L_{v,u}}{v_{\text{т}}} - t_3 \text{ (если } K_v \neq H_u).$$

Дуги $V2 \rightarrow V3$, соответствующие возврату в МПД, формируются отдельно в соответствии с описанием переходов $V2 \rightarrow V3$: из каждой вершины $V2$ исходит $|PPD|$ дуг в вершины $V3$.

Значения $t_{\text{ож}d(v,u)}$ вычисляются только для дуг $d(v,u) \in D$ и неотрицательны.

Порядок формирования множеств D , P и вычисления η_a . Множество дуг D формируется проверкой выполнимости переходов между езками по временным условиям (для пар (v, u) при соблюдении хронологического порядка), после чего вычисляются атрибуты дуг (в т.ч. ожидание). Множество цепей P строится как множество всех (или отобранных) простых путей в графе $G(V, D)$, начинающихся в $V1$ и заканчивающихся в $V3$. Для каждой цепи P_a вычисляется параметр замкнутости ζ_a . Требование замкнутости по МПД учитывается ограничением по формуле (17), запрещающим назначение МТС на цепи с $\zeta_a = 0$. Для каждой построенной цепи P_a выполняется предварительная проверка по режиму труда и отдыха согласно формулам (16.1)–(16.5), по результатам которой устанавливается $\eta_a \in \{0,1\}$. В оптимизационной задаче используются только η_a и ограничение по формуле (16), допускающее выбор цепей лишь при $\eta_a = 1$.

При этом на переменные накладываются следующие ограничения:

1. Покрытие всех ездов с пассажирами ровно один раз:

$$\sum_{a=1}^{|P|} \delta_{a,v} \sum_{e=1}^{|T|} y_{a,e} = 1, \forall v \in V2. \quad (12)$$

где $\delta_{a,v}$ – параметр принадлежности; $\delta_{a,v} = 1$, если езда с пассажирами $v \in V2$ входит в цепь P_a ; $\delta_{a,v} = 0$ – если иначе.

Поскольку $\delta_{a,v}$ не зависит от e , внутренняя сумма $\sum_{e=1}^{|T|} y_{a,e} \in \{0,1\}$ выступает индикатором выбора цепи P_a

(цепь используется тогда и только тогда, когда $\sum_{e=1}^{|T|} y_{a,e} = 1$).

2. Одно МТС не может быть назначено более чем на одну цепь:

$$\sum_{a=1}^{|P|} y_{a,e} \leq 1, \forall e \in \{1, \dots, |T|\} \quad (13)$$

3. На одну цепь назначается не более одного МТС:

$$\sum_{e=1}^{|T|} y_{a,e} \leq 1, \forall a \in \{1, \dots, |P|\}. \quad (14)$$

Цепь a считается выбранной, если $\sum_{e=1}^{|T|} y_{a,e} = 1$; иначе цепь не используется.

4. Ограничение по вместимости. Для каждой цепи заранее вычислим пассажиронапряженность: $\Pi_a^{\max} = \max\{\Pi_v : v \in V2, \delta_{a,v} = 1\}$. Т.е. Π_a^{\max} – максимальная пассажиронапряженность среди ездов с пассажирами $v \in V2$, входящих в цепь P_a (для которых $\delta_{a,v} = 1$). Тогда ограничение по вместимости задается линейно через назначение МТС: если цепь P_a не выбрана ($\sum y_{a,e} = 0$), ограничение выполняется автоматически; если выбрана, то $\max \Pi_a$ не превышает γ_{\max} долю вместимости назначенного МТС. Отметим, что коэффициент пассажиронапряженности зависит от вместимости назначенного МТС и поэтому не вводится как отдельный параметр γ для ездки. В модели контроль выполняется непосредственно через Π_a^{\max} , C_e и порог γ_{\max} в ограничении согласно

формуле (15). При интерпретации решения фактический коэффициент может быть рассчитан как $\gamma_{a,e} = \frac{\Pi_a^{\max}}{C_e}$

для тех пар (a, e) , где $y_{a,e} = 1$:

$$\Pi_a^{\max} \sum_{e \in T} y_{a,e} \leq \gamma_{\max} \sum_{e \in T} C_e y_{a,e}, \forall a = 1, \dots, |P|. \quad (15)$$

5. Режим труда и отдыха (как фильтр допустимых цепей).

$$\sum_{e=1}^{|T|} y_{a,e} \leq \eta_a, \forall a \in P. \quad (16)$$

Параметр $\eta_a \in \{0,1\}$ не является переменной оптимизационной задачи и определяется предварительной проверкой цепи P_a на соответствие требованиям³. Ниже формулы (16.1)–(16.5) описывают порядок вычисления

³ Об утверждении Положения о рабочем времени и времени отдыха водителей автомобилей, троллейбусов и трамваев: постановление Министерства транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь от 9 янв. 2025 г. № 1 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W22543017> (дата обращения 03.01.2026).

величин и правила проверки условий, по результатам которых устанавливается значение η_a . В оптимизационной постановке используется только ограничение по (16), которое допускает выбор цепей P_a лишь при $\eta_a = 1$.

Далее для каждой цепи P_a последовательно по времени начала ездки вычисляются следующие величины:

1) суммарная продолжительность управления транспортным средством в цепи P_a :

$$T_{упр,a} = \sum_{v \in V(P_a)} (t_{kv} - t_{nv}) + \sum_{d(v,u) \in D(P_a)} t_{двd(v,u)}, \quad (16.1)$$

где первая сумма учитывает длительность всех ездки, вошедших в цепь (включая нулевые), а вторая – порожние пробеги между конечным пунктом одной ездки и начальным пунктом следующей;

2) перерыв(ы) для отдыха и питания (обед). Введем календарную длительность цепи (время между началом первой и окончанием последней ездки): $T_{кал,a} = t_k(v_{посл}) - t_n(v_{пер})$, где $v_{пер}$ – первая ездка цепи (первая нулевая ездка), $v_{посл}$ – последняя ездка цепи (вторая нулевая ездка). Перерыв(ы) для отдыха и питания (обед) в цепи P_a формируются из интервалов неуправления (ожиданий) между последовательно выполняемыми ездками. Для городских регулярных перевозок допускается предоставление обеда с отклонением от момента $\Delta_{пит}$ при необходимости завершения маршрута. Отклонение $\Delta_{пит}$ формализуется параметром $\Delta_{пит}^{см}$. Выбранная длительность обеда обозначается $t_{пит,a}$ и должна удовлетворять:

- если $T_{кал,a} \leq \Delta_{пит}$, то $t_{пит,a} = 0$, а условия на $\tau_{пит,a}$ не применяются;
- если $T_{кал,a} > \Delta_{пит}$ то $t_{пит}^{мин} \leq t_{пит,a} \leq t_{пит}^{max}$, $\tau_{пит,a} - t_{n(v_a,0)} \leq \Delta_{пит} + \Delta_{пит}^{см}$.

Величина $\tau_{пит,a}$ (момент начала перерыва) имеет смысл только при наличии перерыва для отдыха и питания. Поэтому для цепей с $T_{кал,a} \leq \Delta_{пит}$ полагаем $t_{пит,a} = 0$, а условия на $\tau_{пит,a}$ не применяются. Для цепей с $T_{кал,a} > \Delta_{пит}$ перерыв выбирается из интервалов ожидания, засчитываемых как обед, и дополнительно контролируется требование $\tau_{пит,a} - t_{n(v_a,0)} \leq \Delta_{пит} + \Delta_{пит}^{см}$. Аналогично требование «момент предоставления первого перерыва не позднее $\Delta_{пит} + \Delta_{пит}^{см}$ » применяется только если $W_{пит}(P_a) \neq \emptyset$.

При необходимости допускается два перерыва суммарной продолжительностью не более $T_{пит}^{\sum max}$, при этом длительность каждого перерыва должна быть не менее $t_{пит}^{мин}$;

3) ограничение на непрерывное управление и дополнительный специальный перерыв. При обходе цепи P_a накопленная продолжительность управления $T_{упр,непр}$ обнуляется только на тех интервалах ожидания $w \in W_{сп}(P_a)$, для которых $t_{ож}(w) \geq t_{сп}^{мин}$, где $t_{ож}(w)$ – длительность соответствующего ожидания (ожидание на дуге между последовательно выполняемыми ездками). Специальный перерыв включается в рабочее время. Если он совпадает с перерывом для отдыха и питания ($w \in W_{пит}(P_a)$), отдельный специальный перерыв не требуется.

Обозначим через $W(P_a)$ множество интервалов ожидания (неуправления) на дугах между последовательно выполняемыми элементами цепи P_a , для которых $t_{ож} > 0$. Подмножество $W_{пит}(P_a) \subseteq W(P_a)$ далее используется для обозначения интервалов ожидания, которые могут быть засчитаны как перерыв для отдыха и питания.

$$W_{сп}(P_a) = \{w \in W(P_a) | t_{ож}(w) \geq t_{сп}^{мин}\}. \quad (16.3)$$

В момент начала каждой ездки значение $T_{упр,непр}$ увеличивается на $(t_{kv} - t_{nv})$; при наличии перед следующей ездкой интервала $w \in W_{сп}(P_a)$ значение $T_{упр,непр}$ обнуляется (считается предоставленным дополнительный специальный перерыв). Требование соблюдается, если во всей цепи выполняется:

$$T_{упр,непр} \leq T_{упр,непр}^{max} \text{ на всем протяжении обхода цепи.} \quad (16.4)$$

Если интервал неуправления, используемый как дополнительный специальный перерыв, совпадает с перерывом для отдыха и питания, отдельный специальный перерыв не требуется;

4) длительность смены (рабочего дня) для цепи P_a . Далее используем введенные обозначения $W(P_a)$ и $W_{пит}(P_a) \subseteq W(P_a)$ для определения длительности смены (рабочего дня) цепи P_a . Выберем под перерыв(ы) для отдыха и питания подмножество $W_{пит}(P_a) \subseteq W(P_a)$. Подмножество $W_{пит}(P_a) \subseteq W(P_a)$ считается допустимым выбором перерыва(ов), если оно состоит из одного или двух интервалов ожидания и выполняются условия:

- каждый выбранный интервал имеет длительность не менее $t_{пит}^{мин}$;
- суммарная засчитанная длительность перерыва(ов) для отдыха и питания $t_{пит,a} = \sum_{d \in W_{пит}(P_a)} t_{ожd}$. Если

$T_{кал,a} > 240$ мин, то $t_{пит}^{мин} \leq t_{пит,a} \leq t_{пит}^{max}$. Если $T_{кал,a} \leq 240$ мин, то $W_{пит}(P_a) = \emptyset$ и $t_{пит,a} = 0$;

- при двух перерывах их сумма не больше $T_{\text{пит}}^{\sum \max}$;
- момент предоставления первого перерыва не позднее $\Delta_{\text{пит}}$ (допуская смещение при необходимости завершения маршрута).

Если не существует ни одного допустимого $W_{\text{пит}}(P_a)$, то $\eta_a = 0$.

Тогда суммарная длительность перерыва(ов) для отдыха и питания:

$$t_{\text{пит},a} = \sum_{d \in W_{\text{пит}}(P_a)} t_{\text{ожд}}$$

Тогда длительность смены (рабочего дня) для цепи P_a определяется как

$$T_{\text{см},a} = T_{\text{кал},a} - t_{\text{пит},a}, \quad (16.5)$$

т.е. перерыв(ы) для отдыха и питания, заданные множеством $W_{\text{пит}}(P_a)$, в рабочее время не включаются; все прочие интервалы ожидания $W(P_a) \setminus W_{\text{пит}}(P_a)$ относятся к рабочему времени как время ожидания в местах посадки-высадки пассажиров.

Цепь P_a считается допустимой по режиму труда и отдыха ($\eta_a=1$), если одновременно выполняются ограничения $T_{\text{см},a} \leq T_{\text{см}}^{\max}$, $T_{\text{упр}} \leq T_{\text{упр}}^{\max}$ а также соблюдены условия (16.1) – (16.5). В противном случае $\eta_a=0$ и ограничение (16) запрещает выбор такой цепи в оптимизационной задаче.

6. Замкнутости цепи по МПД – МТС должно вернуться в тоже МПД, из которого выехало:

$$\sum_{e \in T} y_{a,e} \leq \zeta_a, \quad \forall a = 1, \dots, |P|. \quad (17)$$

$$\zeta_a = \begin{cases} 1, & H_{v_a,0} = K_{v_a,k_a}, \\ 0, & H_{v_a,0} \neq K_{v_a,k_a}. \end{cases}$$

Здесь $\zeta_a \in \{0,1\}$ – параметр (признак) замкнутости цепи P_a по МПД, вычисляемый на этапе формирования множества рассматриваемых цепей P . В оптимизационной задаче ζ_a считается заданным, и ограничение по формуле (17) запрещает назначение МТС на цепи с $\zeta_a = 0$.

Для корректного учета многодеповости фиксируем МПД каждого МТС t_e параметром $p_e \in PPD$. Для цепи P_a ее МПД определяется как $p_a := H_{v_a,0}$. Введем параметр совместимости:

$$g_{a,e} = \begin{cases} 1, & p_e = p_a, \\ 0, & p_e \neq p_a. \end{cases}$$

Здесь $g_{a,e} \in \{0,1\}$ – параметр (признак) совместимости МТС t_e и цепи P_a по МПД, вычисляемый по значениям p_e и p_a . В оптимизационной задаче $g_{a,e}$ считается заданным, а ограничение по (17.1) запрещает назначение МТС на цепь при $g_{a,e} = 0$.

Назначение МТС на цепь допускается только при совпадении МПД:

$$y_{a,e} \leq g_{a,e}, \quad \forall a = 1, \dots, |P|, \quad \forall e \in T. \quad (17.1)$$

Это исключает назначение МТС из другого МПД и дополняет условие замкнутости по формуле (17).

7. Двоичность:

$$y_{a,e} \in \{0,1\}, \quad \forall a = 1, \dots, |P|, \quad \forall e \in \{1, \dots, |T|\}. \quad (18)$$

Решение задачи (10) с учетом (11) и ограничений по (12)–(18) позволяет выбрать набор цепей P_a , покрывающих все ездки $v \in V2$ ровно один раз, и назначить каждой выбранной цепи одно МТС t_e с учетом ограничений по вместимости (15), допустимости режима труда и отдыха согласно формуле (16), многодеповости (17), минимизируя приведенные место-часы (место-время) выполнения всех ездок, а, следовательно, себестоимость перевозки.

Заключение. В статье выполнено совершенствование ранее предложенной математической модели мультимаршрутного планирования работы МТС на городской маршрутной сети. Основным результатом работы является разработка графовой постановки задачи мультимаршрутного планирования, в которой все ездки за сутки представлено вершинами ориентированного атрибутированного графа, а возможные переходы между ездками – дугами с расчетом длительностей ожидания и порожних перегонов. Предложенный подход обеспечивает построение множества допустимых цепей графа, интерпретируемых как возможные варианты выполнения ездки одним МТС в течение смены. Введенная целевая функция минимизирует приведенные место-часы транспортного предложения, учитывая различие экономической «ценности» времени движения и времени ожидания за счет коэффициента приведения, зависящего от пассажироместимости МТС.

По сравнению с ранее выполненными исследованиями ключевым развитием модели является учет двух практических факторов, существенно влияющих на реализуемость и качество планирования: многодеповости и режимов труда и отдыха водителей. Многодеповость реализована через введение технических множеств первых и вторых нулевых ездов и требование замкнутости цепей по месту постоянной дислокации, что обеспечивает корректный учет нулевых пробегов и формирование сменных заданий, выполнимых в условиях нескольких депо. Ограничения по режиму труда и отдыха учтены более полно за счет предварительной проверки цепей на соответствие нормативным требованиям по длительности смены, суммарному и непрерывному времени управления, а также предоставлению перерывов для отдыха и питания и специальных перерывов, что позволяет исключать недопустимые варианты еще на этапе формирования множества цепей.

Сформулированная математическая модель с ограничениями покрытия пассажирских ездов, взаимно-однозначного назначения МТС на выбранные цепи, требований по вместимости и допустимости по режиму труда и отдыха обеспечивает получение рационального плана работы МТС, минимизирующего приведенные затраты времени, а следовательно, и себестоимость выполнения транспортной работы. Практическая значимость результатов заключается в создании теоретической основы для разработки инструментов поддержки принятия решений (компьютерной программы) при суточном планировании и диспетчерском управлении МТС в условиях сложной маршрутной сети и множественности эксплуатационных ограничений.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой вычислительно эффективных методов генерации и отбора допустимых цепей, учетом изменяющихся по времени скоростей движения и спроса, а также расширением модели дополнительными критериями и ограничениями с учетом запроса производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аземша С.А. Мультимаршрутный метод организации работы транспортных средств // Вестник СибАДИ. – 2025. – № 22(1). – С. 38–53. DOI: 10.26518/2071-7296-2025-22-1-38-53. EDN XJRPEO
2. Аземша С.А. Обоснование целесообразности и постановка задачи мультимаршрутной организации работы пассажирских транспортных средств регулярного сообщения // Прогрессивные технологии в транспортных системах: материалы XIX Вс. науч.-практ. конф. с междунар. участием / под ред. В.И. Рассохи; Оренбург. гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2025. – С. 12–20.
3. Аземша С.А. Мультимаршрутный метод организации работы городского пассажирского транспорта регулярного сообщения // Перспективы развития транспортного комплекса: сб. ст. / Белорус. науч.-исслед. ин-т трансп. «Транстехника»; редкол.: В.С. Миленький и др. – Минск: БелНИИТ «Транстехника», 2024. – С. 180–186. – URL: <https://www.transtekhnika.by/nauchnye-razrabotki/nauchnye-publikatsii/>
4. Аземша С.А., Янкович С.Ю. Оценка эффективности ежесуточного управления парком модульных пассажирских транспортных средств на городских регулярных маршрутах // Недропользование и транспортные системы. – 2024. – № 14(1). – С. 4–17. DOI: 10.18503/SMTS-2024-14-1-4-17

Поступила 19.01.2026

MULTI-ROUTE PLANNING FOR ROUTE VEHICLES TAKING INTO ACCOUNT MULTI-DEPOT OPERATIONS AND DRIVER WORK/REST REGULATIONS

S. AZEMSHA

(Belarussian State University of Transport, Gomel)

A mathematical model for scheduling route transport operations on the city network has been improved. All trips per day are represented by vertices of a directed graph, and possible transitions between trips are represented by arcs, with waiting times and empty legs calculated. The construction of a set of feasible graph chains is interpreted as possible trip options for a single vehicle during a shift. Multiple depots and driver work and rest schedules are taken into account. Multiple depots are implemented through the introduction of first and second zero trips and the requirement that chains be closed at their permanent locations. Restrictions on work and rest schedules are implemented through preliminary chain verification for compliance with regulatory requirements for shift duration, total and continuous work time, and provision of rest and meal breaks. The mathematical model ensures a rational work plan that minimizes the reduced time costs and, consequently, the cost of transportation operations. The practical significance of the results lies in the creation of a theoretical basis for decision-making in daily planning and dispatch control of route vehicles in a complex route network.

Keywords: passenger flow, route vehicle, multi-route planning, optimization, work and rest regulations, multi-depot operation.

УДК 656.015

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-52-55

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ
ГОРОДОВ С ТРАМВАЙНЫМ ДВИЖЕНИЕМ:
ОТ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ К ПРАКТИЧЕСКИМ РЕШЕНИЯМ**

А.А. КУСТЕНКО

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

д-р техн. наук, проф. Д.В. КАПСКИЙ

(Высшая аттестационная комиссия Республики Беларусь, Минск)

Статья посвящена разработке комплексного подхода к оптимизации движения с участием трамваев в городских условиях, обеспечивающего повышение эффективности транспортных систем за счет: математической модели прогнозирования задержек трамваев на перекрестках, основанной на коэффициенте синхронизации фаз и учитывающей стохастическую природу прибытия транспортных средств; имитационной модели совместного движения трамваев и автомобилей в зоне остановочных пунктов с посадкой пассажиров с проезжей части; методики расчета задержек автомобилей с использованием функций Хевисайда. Практическая апробация проведена на трамвайной сети г. Минска и показала свою эффективность.

Ключевые слова: трамвайное движение, математическое моделирование, коэффициент синхронизации светофорных фаз, имитационное моделирование, адаптивное регулирование.

Введение. Трамвай является ключевым элементом устойчивой городской мобильности, обеспечивая экологичную перевозку пассажиров в условиях урбанизации [1; 2]. Интеграция трамваев в существующую инфраструктуру требует обеспечения безопасности и минимизации временных потерь для всех участников движения [3; 4]. Существующие методы не учитывают специфику трамвая (фиксированный маршрут, детерминированные остановки и время прибытия) [5; 6].

Цель настоящего исследования – разработка комплексного подхода к оптимизации движения с участием трамваев в городских условиях, обеспечивающего повышение эффективности транспортных систем.

Основная часть. Для выявления закономерностей прибытия трамваев проведены исследования на светофорных объектах (СФО) г. Минска, различающихся количеством ОП (от 0 до 2).

Прибытие трамваев к СФО носит закономерный характер. На перекрестке ул. Я. Колоса – ул. Дорошевича (перед СФО нет ОП) 62% трамваев прибывают в 10-секундном интервале; ул. Куйбышева – пр-т Машерова (один ОП перед СФО) 70% – в 15-секундном интервале; Старовиленский тракт – ул. Нововиленская (два ОП перед СФО) 62% – в 25-секундном интервале [1].

Установлена зависимость времени простоя трамвая на ОП от интенсивности пассажирообмена ($R^2 = 0,973$):

$$t_{\text{оп}} = 0,508 \cdot Q_{\text{пас.об.}} + 9,96, \text{ с.} \quad (1)$$

где $t_{\text{оп}}$ – время нахождения трамвая на ОП, с;
0,508 – коэффициент регрессии, с/пасс.;
 $Q_{\text{пас.об.}}$ – пассажирообмен на ОП, пасс.;
9,96 – свободный член уравнения регрессии, с.

Зависимость скорости движения трамвая от протяженности участка безостановочного движения ($R^2 = 0,916$):

$$V_{\text{мп}} = 20,3 + 0,028 \cdot L_{\text{уч}}, \text{ км/ч,} \quad (2)$$

где $L_{\text{уч}}$ – длина участка безостановочного движения, м.
Время прибытия ко второму (следующему) объекту определяется [2; 3]:

$$t_{\text{прт}}^{\text{сфо}} = \left(t_{\text{дв}} + \sum_{i=1}^{n_{\text{оп}}} t_{\text{оп}i} + t_{\text{o}} - t_{\text{сд}} \right) \text{ mod } C, \text{ с,} \quad (3)$$

где $t_{\text{дв}}$ – время движения по участку маршрута между СФО, с;
 $t_{\text{оп}i}$ – время нахождения на i -м ОП, с;
 $n_{\text{оп}}$ – количество ОП на участке маршрута между СФО;
 t_{o} – время отправления от первого светофора (СФО1) относительно времени включения «зеленого» сигнала следующего светофора (СФО2), с;
 $t_{\text{сд}}$ – временной сдвиг между включением «зеленого» сигнала цикла на двух соседних СФО, с;
 C – время цикла СФО2, с.

Для упрощения работы с целевой функцией введен безразмерный коэффициент синхронизации фаз η_c :

$$\eta_c = \left\{ \frac{\left(\sum_{i=1}^{ny_i} \left(\frac{l_{умi} \cdot a_T + V_{тpи}^2}{a_T \cdot V_{тpи}} \right) + \sum_{i=1}^{n_{оп}} t_{он} + t_o - t_{сд} \right)}{C} \right\}. \quad (4)$$

Значение $\eta_c \approx 0$ (или близкое к 1) указывает на прибытие трамвая в начале разрешающего сигнала СФО2.

Для практической реализации оптимального режима движения трамваев разработан алгоритм адаптивно-светофорного регулирования, обеспечивающий приоритетный проезд трамвая через СФО при сохранении удобства автомобилей: детектирование приближения трамвая к СФО; расчет прогнозного значения η_c ; принятие решения о необходимости корректировки; корректировка фаз; компенсация сдвига после проезда трамвая путем постепенного возврата к номинальным параметрам регулирования [3]. Его преимущество – динамическое управление фазами: при отсутствии трамвая у СФО трамвайная фаза исключается, что снижает задержки автомобилей на 15–25% при типичных параметрах ($t_{тp} = 15–20$ с, $C = 90$ с, $x_{авт} = 0,6–0,7$) [3].

Имитационное моделирование на участке с тремя СФО показало, что адаптивное регулирование на основе η_c обеспечивает снижение: средней задержки трамвая на 60–70% по сравнению с жестким локальным регулированием и на 35–40% – с координированным; времени поездки на 10–20%; энергопотребления на 5–12%; повышение регулярности движения трамваев на 15–20%.

ОП с посадкой пассажиров с проезжей части (ПЧ) создают условную динамическую стоп-линию (автомобили обязаны остановиться, чтобы пропустить пассажиров, идущих по ПЧ для посадки/высадки), продолжительность существования которой зависит от времени простоя на ОППЧ и времени прибытия трамвая к СФО относительно работы фаз [4; 5]. Выделяются сценарии: ОП расположен перед перекрестком или за ним, требующие оптимизации параметров системы.

Разработана имитационная модель с модульной архитектурой [4; 5]: модуль трамвайного движения – имитирует кинематику движения трамвая с ускорением, технической скорости, длины ОП и времени простоя на ОППЧ; автомобильного потока – генерирует автомобили со случайными интервалами прибытия, распределенными по нормальному закону; взаимодействия – реализует алгоритм формирования динамической стоп-линии при въезде трамвая в зону ОППЧ и событийное управление процессом взаимодействия потоков.

Стохастическая генерация параметров движения осуществляется методом Марсальи–Брэя (для нормально распределенных случайных величин скоростей автомобилей и трамвая, времени прибытия трамвая к первому СФО, времени простоя на ОППЧ и интенсивности автомобилей) [5].

Уникален алгоритм формирования условной динамической стоп-линии: при въезде трамвая в зону ОППЧ фиксируется момент времени и координата трамвая; автомобили, находящиеся за трамваем, получают команду остановки у условной стоп-линии; автомобили, находящиеся перед трамваем в этот момент, продолжают движение без ограничений; стоп-линия существует в течение времени; после завершения посадки-высадки пассажиров и закрытия дверей трамвая стоп-линия снимается, и автомобили возобновляют движение.

Моделирование проведено для типичных параметров трамвайной сети: расстояние между СФО $S_{уч} = 300–500$ м, $C = 90$ с, $\lambda = 0,33–0,44$, длина зоны ОППЧ $l_{он} = 15–25$ м, время посадки/высадки $t_{он} = 15–30$ с, $q_a = 200–600$ авт/ч. Установлено, что время существования условной стоп-линии минимально, когда трамвай прибывает к первой стоп-линии в конце зеленого сигнала независимо от расположения ОППЧ. При низкой интенсивности автомобилей ($q_a < 300$ авт/ч) эффективно расположение ОППЧ перед перекрестком, обеспечивающее меньшие суммарные задержки автомобилей. При высокой интенсивности ($q_a > 300$ авт/ч) – за перекрестком с оптимизацией времени прибытия трамвая к СФО на основе коэффициента η_c .

Аналитическая методика расчета задержек автомобилей перед ОППЧ основана на унифицированном математическом описании пяти сценариев взаимодействия [5]: в зависимости от расположения ОППЧ относительно перекрестка (до или после СФО), времени прибытия трамвая к СФО (на разрешающий или запрещающий сигнал) и соотношения времени посадки-высадки с длительностью фаз.

Предложено использование ступенчатых функций Хевисайда $H(t)$: $H(t) = 0$, если $t < 0$; $H(t) = 1$, если $t \geq 0$, что позволяет записать условия возникновения задержек в компактной математической форме, учитывающей различные временные соотношения параметров системы.

Упрощенная формула расчета задержки автомобилей перед ОППЧ:

$$D_a = q_a \cdot t_{он} \cdot H(t_{он}) \cdot \left(\frac{t_{он}}{2} + t_{разг} \right), \text{ авт} \cdot \text{с}, \quad (5)$$

где q_a – интенсивность автомобилей, авт/с;

$H(t_{он})$ – функция Хевисайда, обнуляющая задержку при отсутствии стоп-линии;

$t_{разг}$ – время разгона автомобилей после снятия стоп-линии, с.

Программный комплекс на языке Python автоматизирует расчет задержек автомобилей при различных схемах организации движения, с использованием библиотек NumPy для численных вычислений и SciPy для работы с распределениями вероятностей.

Верификация методики проведена путем сравнения результатов аналитических расчетов с данными имитационного моделирования. Средняя относительная погрешность составила 8–12%, что приемлемо для инженерных расчетов.

Эффективная организация движения требует применения специализированных *технических средств*, четко информирующих всех участников движения о приоритетах и разрешенных действиях при конфликтном взаимодействии. Разработан комплекс средств, ориентированных на специфику взаимодействия трамваев, автомобилей и пешеходов [6].

Предложены: пешеходный светофор для нерегулируемых переходов через трамвайные пути; светофор для координации с индикацией рекомендуемой скорости; светофор для регулирования использования полотна автомобилями; трамвайный светофор с индикацией направления и рекомендуемой скорости; трамвайный светофор для перекрестков с несколькими направлениями движения; светофор с дополнительной секцией для предупреждения о приближении трамвая.

Предложена дорожная разметка [6]: цветная – для выделения трамвайных путей и зон конфликтного взаимодействия; светодиодная (LED) – для повышения видимости в темное время суток и при неблагоприятных погодных условиях; 3D – для визуального предупреждения водителей о приближении к опасным зонам.

Рекомендованы: автоматические барьеры в зонах ОППЧ, синхронизированные с открытием дверей трамвая; разделительные ограждения вдоль полотна на участках совместного движения с автомобилями; «умные» ограждения с встроенными датчиками и светодиодной подсветкой.

Применение адаптивного регулирования на основе η_c обеспечивает снижение: задержек трамваев на 60–70%; времени поездки на 10–20%; энергопотребления на 5–12%. Оптимизация расположения ОППЧ обеспечивает снижение задержек автомобилей на 20–35%. Исключение трамвайной фазы снижает задержки автомобилей на 15–25%; интегральная оптимизация системы повышает пропускную способность перекрестков на 8–12%.

Перспективными являются интеграция моделей и алгоритмов в системы автоматического управления трамваями (АТО – Automatic Train Operation), использование телематики и больших данных для прогнозирования параметров движения, разработки адаптивных алгоритмов с применением методов машинного обучения для автоматической настройки параметров регулирования, а также расширение применения технических средств на всю трамвайную сеть с централизованным мониторингом и управлением.

Заключение. В результате исследования получены следующие научные и практические результаты:

- математическая модель прогнозирования задержек трамваев на перекрестках, основанная на коэффициенте синхронизации фаз и стохастическом нормальном распределении времени прибытия, учитывающая инфраструктурные факторы и обеспечивающая точное прогнозирование для настройки координации;
- имитационная модель совместного движения трамваев и автомобилей в зоне ОП у перекрестка, реализованная на микроскопическом подходе с модульной архитектурой и стохастической генерацией параметров, учитывающая динамическую стоп-линию при посадке пассажиров с ПЧ и позволяющая определять оптимальные пространственно-временные параметры для минимизации задержек и повышения безопасности;
- методика расчета задержек автомобилей перед ОП трамвая с посадкой с ПЧ, использующая функции Хевисайда для унифицированного описания конфликтных сценариев и детерминированно-стохастический подход к оценке пропускной способности, реализованная в виде программного комплекса для автоматизированной оценки транспортно-экономических потерь, и обоснования решений;
- комплекс технических средств приоритетного регулирования в зонах конфликтного взаимодействия «трамвай–автомобиль–пешеход», снижающий аварийность и задержки за счет четкого визуального разделения приоритетов и фаз.

Апробация на реальной сети подтвердила эффективность разработок в системе автоматизированного управления движением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кустенко А.А., Капский Д.В. К вопросу расчета задержек трамваев у светофорного объекта с учетом детерминированных и случайных факторов // Мир транспорта и технологических машин. – 2025. – № 3-3(90). – С. 52–60.
2. Кустенко А.А., Капский Д.В., Ларин О.Н. Исследование влияния светофорного регулирования на эффективность трамвайного движения // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2025. – № 2. – С. 26–33.
3. Кустенко А.А., Капский Д.В., Ларин О.Н. Математическое моделирование синхронизации трамвайного движения со светофорным регулированием // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2025. – № 3(82). – С. 76–85.
4. Кустенко А.А., Капский Д.В., Ларин О.Н. Моделирование движения транспортных средств в местах посадки пассажиров в трамвай с проезжей части // Транспорт Урала. – 2025. – № 2(85). – С. 22–28.

5. Методика расчета задержек транспортного потока перед остановочным пунктом трамвая с посадкой с проезжей части / А.А. Кустенко, Д.В. Капский, Н.А. Филиппова и др. // Современные системы и технологии на транспорте: проблемы и перспективы: материалы МНПК, посвящ. 95-летию ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова / Воронеж (24–25 апр. 2025 г.). – Воронеж, 2025. – С. 171–184.
6. Кустенко А.А., Капский Д.В., Чикишев Е.М. Современные технические решения в организации трамвайного движения // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2025. – № 6. – С. 52–59. DOI 10.36535/0236-1914-2025-06-8

Поступила 17.04.2026

**IMPROVING THE EFFICIENCY OF URBAN TRANSPORT SYSTEMS
WITH TRAM TRAFFIC:
FROM MATHEMATICAL MODELS TO PRACTICAL SOLUTIONS**

A. KUSTENKA

(Belarusian National Technical University, Minsk)

D. KAPSKI

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

This article explores the development of a comprehensive approach to optimizing tram traffic in urban environments. This approach improves the efficiency of transport systems by using a mathematical model for predicting tram delays at intersections, based on a phase synchronization coefficient and accounting for the stochastic nature of vehicle arrivals; a simulation model for the combined movement of trams and cars at stops with passenger boarding from the roadway; and a method for calculating vehicle delays using Heaviside functions. Practical testing was conducted on the Minsk tram network and demonstrated its effectiveness.

Keywords: *tram traffic, mathematical modeling, traffic light phase synchronization coefficient, simulation modeling, adaptive traffic control.*

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 665.733.5; 62-762.444

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-56-61

СТОЙКОСТЬ РЕЗИН
К ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПОНЕНТОВ АВТОМОБИЛЬНЫХ БЕНЗИНОВ*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ,**канд. техн. наук, доц. А.А. ЕРМАК**ORCID <https://orcid.org/0000-0003-4398-1796>**Ж.А. АБДУМУМИНОВ**ORCID <https://orcid.org/0009-0005-3476-2622>**(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)*

Представлены результаты изучения влияния компонентов бензина, таких как ароматические углеводороды, бензин каталитического риформинга, циклогексан, изооктан, этиловый и *n*-бутиловый спирты, МТБЭ, на резины на основе EPDM, NBR, HNBR и FKM каучуков. Установлены закономерности изменения массы образцов резин под воздействием компонентов бензина. Показано, что резина на основе EPDM каучука не пригодна для использования в качестве уплотнительных материалов при контакте с компонентами бензина в связи со значительной потерей массы и эластичности образца. Устойчивость к разрушению у резин из NBR и HNBR каучука ароматическими компонентами бензина примерно одинакова. При этом резины на основе HNBR каучука обладают более высокой устойчивостью к набуханию и разрушению изооктаном и циклогексаном. Наилучшую устойчивость к воздействию компонентов бензина имеет образец резины на основе фторкаучука. Значительное его набухание отмечается только при погружении в МТБЭ. Признаков разрушения резины на основе FKM каучука при контакте со всеми изученными компонентами автомобильных бензинов не выявлено.

Ключевые слова: *резины, EPDM, NBR, HNBR, FKM, ароматические углеводороды, бензин каталитического риформинга, циклогексан, изооктан, спирты, МТБЭ, набухание, потеря массы.*

Введение. Резиновые уплотнители находят широкое применение в автомобилестроении. В двигателях внутреннего сгорания резиновые кольца используются для уплотнения форсунок, соединений трубопроводов топливной системы, системы охлаждения, блоков цилиндров и пр. Резинотехнические изделия также используются для уплотнения элементов кузова и салона, окон, дверей и багажника [1; 2]. В процессе эксплуатации резиновые уплотнения контактируют с топливом и другими агрессивными жидкостями, которые могут оказывать на них разрушающее действие [3]. В связи с этим изучение влияния топлив и различных технических жидкостей, в т.ч. автомобильных бензинов, на резинотехнические изделия является актуальной задачей.

Современные автомобильные бензины являются многокомпонентными смесями углеводородов различного группового состава и кислородсодержащих октаноповышающих добавок [4; 5]. Бензин оказывает разрушающее воздействие на резину, вызывая ее набухание, размягчение, потерю эластичности и появление трещин. Длительный контакт приводит к деформации и потере механических свойств [6]. В современных автомобилях используются различные виды резин¹:

– этилен-пропилен-диеновый каучук или EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer/M-class rubber). Он находит применение в качестве наружных уплотнителей устойчивых к атмосферным воздействиям, старению и истиранию;

– масло и бензостойкие резины, например, бутадиен-нитрильный каучук или NBR (Nitrile Butadiene Rubber), используемый в двигателях и трансмиссиях для предотвращения утечки технических жидкостей;

– химически стойкий синтетический каучук, применяемый для работы в условиях высоких температур, в частности, фторэластомер (Fluoroelastomer Viton) или резина FKM (F – Fluoro (фтор), K – от немецкого Kohlenstoff (углерод), M – обозначение насыщенного каучука (полиметиленового типа)². Фторэластомеры устойчивы к действию масел, топлив и смазок, ароматических углеводородов. Однако их использование нежелательно в присутствии эфиров и кетонов [7].

Цель настоящей работы – изучение влияния компонентов товарных бензинов на прокладки, изготовленные из различного вида резин. Анализ научной литературы показал, что данный вопрос недостаточно изучен.

¹ NBR, FKM, EPDM или PTFE: какой материал выбрать для уплотнения. Статьи Межкомтехника. – URL: <https://www.mkt-rti.ru/company/articles/nbr-fkm-epdm-ili-ptfe-kakoy-material-vybrat-dlya-uplotneniya/?ysclid=mmuwzjr0nm191738367>.

² ГОСТ ISO 1629 – 2019. Каучук и латексы. Номенклатура. – М.: Стандартинформ, 2019. – 10 с.

Исследовательская часть. В эксперименте использовались уплотнительные резиновые кольца, изготовленные из маслонеполненного этилен-пропилен-диенового каучука (EPDM), бутадиен-нитрильного каучука (NBR), гидрированного бутадиен-нитрильного каучука (HNBR) и фторэластомера (FKM). Каучуки EPDM (ГОСТ ISO 4097³) и NBR (ГОСТ 34754)⁴ получены путем вулканизации серой. Гидрированный бутадиен-нитрильный каучук HNBR представляет собой усовершенствованную форму каучука NBR с повышенным содержанием акрилонитрила. Его получают путем гидрирования нитрильной резины. В результате эластомер приобретает повышенную термо- и химическую стойкость. Вулканизация полностью гидрированного HNBR каучука проводится исключительно с помощью пероксидов или высокоэнергетического излучения⁵. Вулканизация пероксидами, по сравнению с вулканизацией серой, способствует образованию более стабильных углерод-углеродных поперечных химических связей, что придает резине высокую термостойкость, низкую остаточную деформацию и высокую устойчивость к старению [8]. Фторкаучук FKM получен эмульсионной полимеризацией винилиденфторида с гексафторпропиленом. По химической стойкости он превосходит все известные резины. FKM устойчив к углеводородам, бензину, маслам и смазкам. Однако фторкаучуки имеют низкую устойчивость к низкомолекулярным органическим кислотам, эфирам и кетонам⁶.

По результатам термогравиметрического анализа образцов в воздушной среде при скорости нагревания 10 °С/минуту температура начала термической деструкции образцов резин, сопровождающаяся потерей массы, составила: для EPDM – 258,6 °С; для NBR – 195,1 °С; для HNBR – 271,0 °С; для FKM – 447,6 °С.

В качестве компонентов автомобильных бензинов использовались: изооктан (2,2,4-триметилпентан); циклогексан; ароматические углеводороды – толуол, ксилолы, псевдокумолы (смесь триметилбензолов); спирты – этиловый, *n*-бутиловый; метилтретбутиловый эфир (МТБЭ); бензин каталитического риформинга (КР) со следующим групповым составом (в % масс.): ароматические углеводороды – 72,5; *n*-алканы – 5,9; изоалканы – 18,6; циклоалканы – 2,5; олефины – 0,5.

Методика изучения стойкости резин к воздействию компонентов автомобильных бензинов заключалась в следующем. Образцы резины выдерживали 3 ч при температуре (23±2) °С на воздухе и взвешивали с точностью 0,0001 г. Образцы помещали в стеклянные колбы с крышкой со 100 мл компонента бензина и выдерживали 72 ч при температуре (23±2) °С. Затем образцы вынимали из компонента бензина, выдерживали 10 мин на воздухе при вышеуказанной температуре и относительной влажности (50±2)% и взвешивали с точностью 0,0001 г. Взвешивание образцов повторяли через 24, 48, 72 и 96 ч. Параллельно проводили испытание 3-х образцов резины. Изменение массы образца после выдерживания в компоненте бензина и сушки определяли путем деления разности масс образца после испытания и массы образца до испытания на массу образца до испытания. За результат измерения принималось среднеарифметическое значение трех параллельно испытанных образцов. Результаты испытаний выражались в % масс. Увеличение массы образца резины свидетельствует о его набухании, а снижение массы – о его растворении или разрушении в компоненте бензина.

Изменение массы образцов исследуемых резин после выдерживания в компонентах бензина в течение 72 ч представлено на рисунке 1.

Установлено, что резины на основе EPDM каучука частично разрушаются при контакте со всеми использованными в работе компонентами бензина. При этом они сохраняют форму исходного изделия. Молекулы компонентов бензина проникая в свободный объем между молекулярными цепями резины способствуют вымыванию входящего в ее состав масла-пластификатора. Наибольшая потеря массы резины из EPDM каучука наблюдается при ее погружении в МТБЭ, изооктан, циклогексан и бутанол. В результате уплотнительные кольца из данного вида резины полностью теряют эластичность.

Анализ изменения массы образцов через 24 ч после их извлечения из компонентов бензина (рисунок 2) показал, что погружение резины из EPDM каучука в компоненты бензина происходит не только к вымыванию содержащихся в нем компонентов, но и к набуханию.

Степень набухания образцов резин в компонентах бензина, определенная как изменение массы образца в результате сушки в течение 24 ч, представлена на рисунке 3.

Механизм набухания резин заключается в проникновении молекул компонентов бензина в структуру полимерной сетки резины. Это приводит к сольватации и увеличению объема образца резины. В процессе сушки происходит диффузия молекул компонентов бензина из объема резины и их испарение. При этом набухание резин в ароматических и непредельных углеводородах выше, чем в алканах [9]. Полученные результаты также свидетельствуют о том, что резина из EPDM каучука набухает в ароматических углеводородах. С уменьшением молекулярной массы ароматических углеводородов и следовательно размеров молекул степень набухания в них

³ ГОСТ ISO 4097-2017. Каучук этилен-пропилен-диеновый (EPDM). Методы оценки. – М.: Стандартинформ, 2019. – 20 с.

⁴ ГОСТ 34754-2021. Каучуки бутадиен-нитрильные (NBR). Приготовление и испытание резиновых смесей. – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 16 с.

⁵ Резина HNBR: какой это материал и его характеристики – Международный Индустриальный Сервис. – URL: <https://rubberfoam.ru/novosti/rezina-hnbr-kakoy-eto-material-i-ego-kharakteristiki/?ysclid=mnafx25uwv206752068>.

⁶ FKM - что за материал, технические характеристики, рабочая температура, химическая стойкость. – URL: <https://profrezina.ru/news/20207/?ysclid=mnagusj4dt32680214>.

резины из EPDM каучука увеличивается. Набухание EPDM резины в бензине каталитического риформинга ниже, чем в ароматических углеводородах. По-видимому, это связано с комплексным воздействием на данный вид резины ароматических, ненасыщенных и насыщенных углеводородов, содержащихся в бензине каталитического риформинга. Наименьшая степень набухания резины из EPDM каучука, как и ее потеря массы после сушки, наблюдается в этаноле. Максимальная потеря массы (33,1% масс.) отмечена при погружении данной резины в МТБЭ. Таким образом, резины из EPDM каучука непригодны для использования в качестве уплотнительных материалов при контакте с компонентами бензина.

Резины на основе NBR каучука проявляют значительно более высокую устойчивость к воздействию компонентов бензина, чем резины из EPDM каучука. Это объясняется присутствием в их составе полярного компонента – нитрила акриловой кислоты (НАК), что приводит к увеличению энергии межмолекулярного взаимодействия между цепями полимера. Это способствует росту устойчивости резины к набуханию в алканах. При этом резина из NBR каучука сильно набухает в ароматических углеводородах: в толуоле – 41,54% масс., в ксилолах – 33,37% масс., в псевдокумолах – 32,50% масс. Набухание образца NBR резины после погружения в высокоароматизированный бензин каталитического риформинга ниже, чем в чистых ароматических углеводородах – 22,45% масс. В спиртах данный вид резины набухает в меньшей степени, чем в эфире.

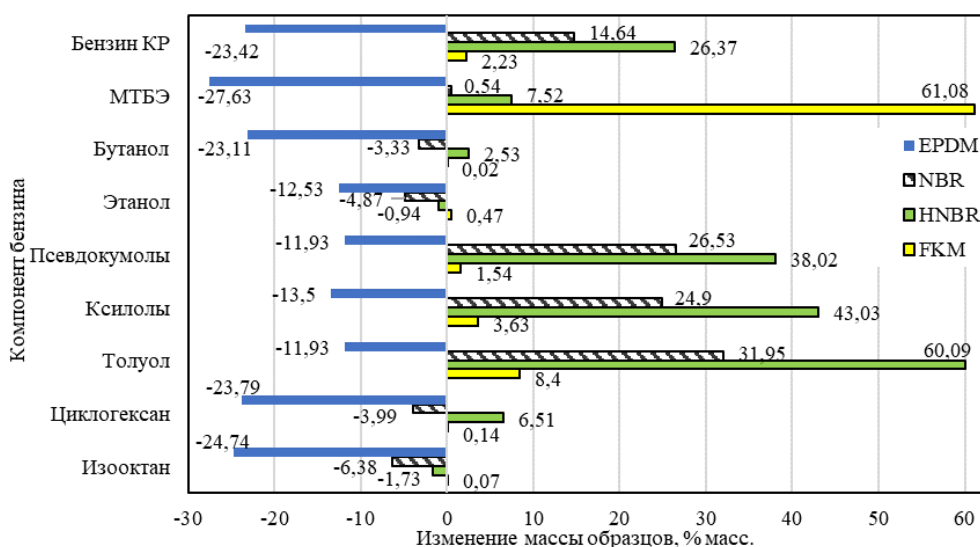


Рисунок 1. – Изменение массы образцов резины после их погружения в течение 72 ч в компоненты автомобильного бензина

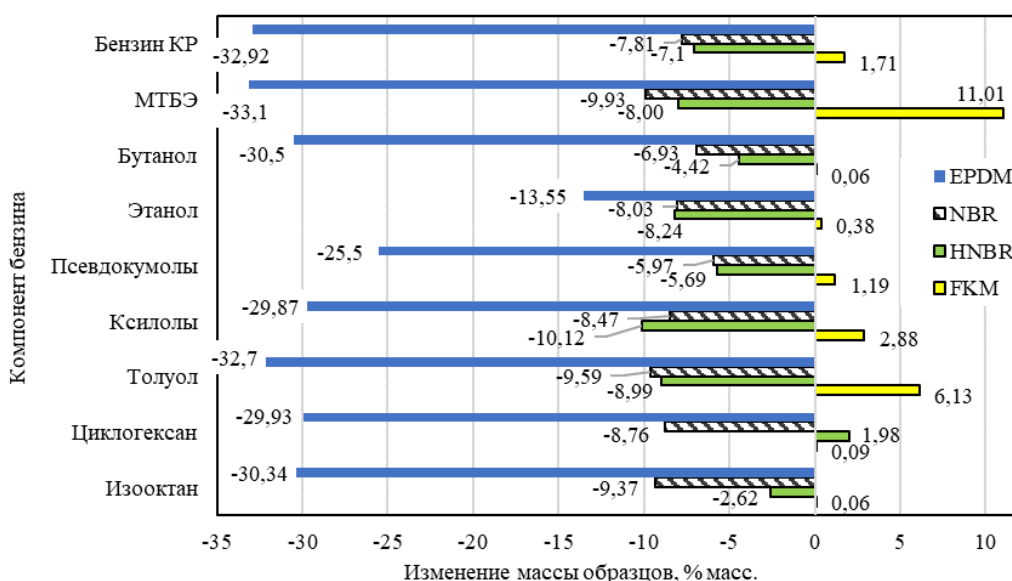


Рисунок 2. – Изменение массы образцов резины после их извлечения из компонента автомобильного бензина и сушки в течение 24 час на воздухе (относительно массы образцов резины до погружения в компонент бензина)

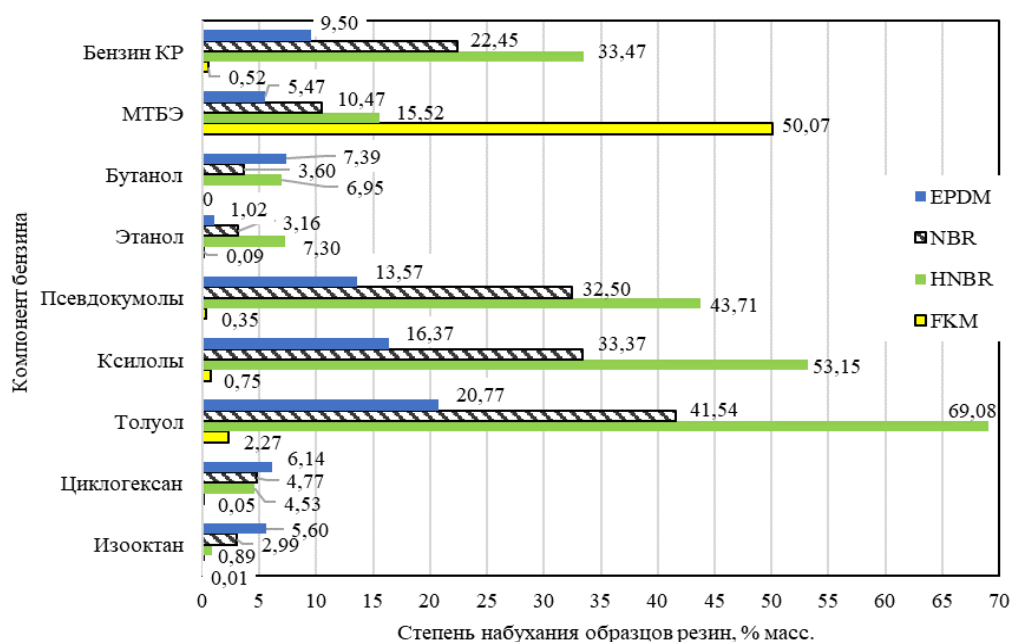


Рисунок 3. – Степень набухания образцов резины в компонентах бензина

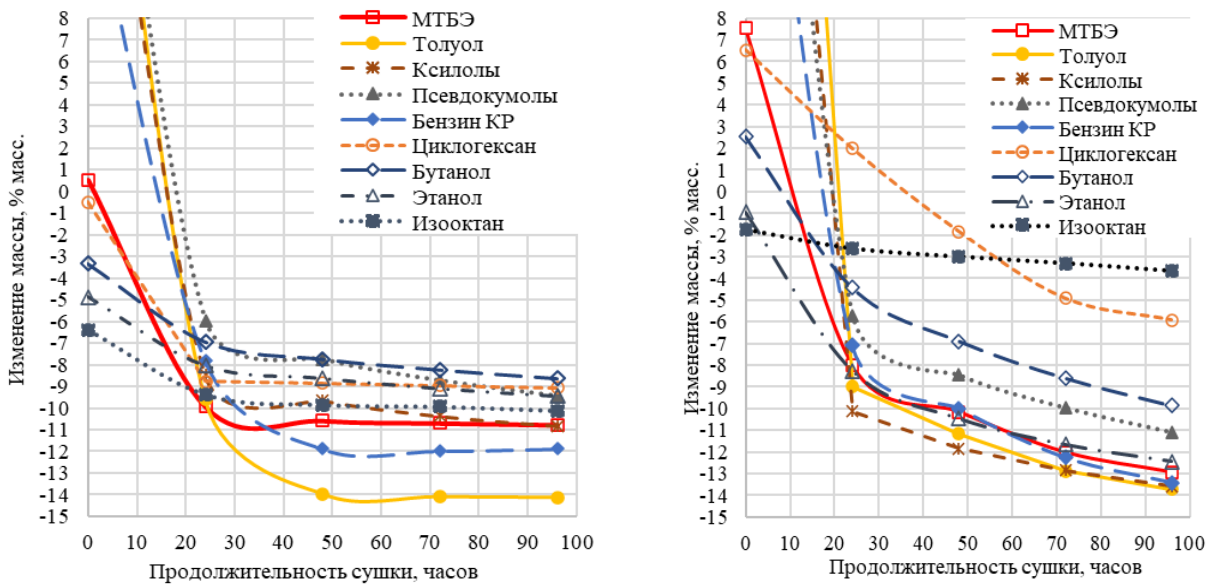
К недостаткам резины из NBR каучука следует отнести относительно высокое содержание в нем ненасыщенных соединений, что приводит к ее старению, в результате чего резина становится твердой и хрупкой. Уплотнительные материалы из данного вида резины, как и из EPDM каучука, после воздействия компонентов бензина, особенно ароматических соединений, теряет эластичность. В настоящее время для изготовления уплотнительных элементов более широко используются резины на основе гидрированных бутадиен-нитрильных каучуков (HNBR) [10–12]. Их получают путем гидрирования традиционных NBR каучуков по двойным связям макромолекулы в присутствии гомогенных и гетерогенных катализаторов [13]. В результате гидрирования двойные связи в макромолекулах преобразуются в одинарные, что повышает их стабильность за счет снижения ненасыщенных центров в молекулярных цепях, через которые может происходить их разрушение.

Изучение влияния компонентов бензина на резины из HNBR каучука показало, что они в большей степени склонны к набуханию в ароматических углеводородах, спиртах и эфире (МТБЭ), чем резины из NBR каучука (см. рисунок 3), но менее склонны к набуханию в изооктане. Потеря массы образцов резины из HNBR каучука под воздействием изооктана и циклогексана ниже, чем у NBR резин, а под воздействием ароматических углеводородов и этанола практически одинакова. Резины из HNBR каучука более устойчивы к воздействию бутанола и МТБЭ (см. рисунок 2). Однако, как показали исследования, испарение компонентов бензина из различных типов резины в одинаковых условиях происходит с различной скоростью. Резины из HNBR более склонны к удержанию в своем объеме компонентов бензина (рисунок 4, б), чем, резины из NBR каучука (рисунок 4, а) и даже после 92 ч сушки испаряются не полностью.

Быстрее всего испаряется из резин изооктан, медленнее – ароматические углеводороды. Наименьшую скорость диффузии и испарения из резины HNBR показал циклогексан (рисунок 4, б). Таким образом, все использованные в настоящей работе компоненты бензина приводят к снижению массы, т.е. частичному разрушению, исследованных образцов резин из NBR и HNBR каучуков. При этом наименьшая устойчивость резины из NBR каучука наблюдается при ее контакте с толуолом и бензином каталитического риформинга, в состав которого входит толуол. Наибольшая устойчивость данная резина проявляет к спиртам и циклогексану (рисунок 4, а). Устойчивость исследуемого образца резины из HNBR каучука снижается в ряду изооктан > циклогексан > бутанол > псевдокумолы > этанол, МТБЭ > толуол, ксилолы, бензин каталитического риформинга (рисунок 4, б).

Наилучшей устойчивостью к большому количеству компонентов бензина обладает образец резины из фторкаучука. При этом сохраняется тенденция уменьшения степени набухания резины с увеличением молекулярной массы ароматических углеводородов (см. рисунок 3). В толуоле набухание резины из FKM каучука составило 2,27% масс., в ксилолах – 0,75% масс., в псевдокумолах – 0,35% масс.

Фторкаучуки обладают очень низкой поверхностной энергией. В результате их поверхность плохо смачивается углеводородами и спиртами. Это затрудняет диффузию компонентов бензина вглубь их полимерной сетки. В тоже время резины из FKM каучука сильно набухают в МТБЭ, что объясняется **высоким** сродством этого компонента бензина к полимерной матрице резины FKM. Молекулы МТБЭ легко проникают между молекулярными цепями каучука, раздвигая их, что приводит к значительному увеличению объема (набуханию).



а

б

Рисунок 4. – Изменение массы образцов резины NBR (а) и HNBR (б) при их сушке на воздухе после погружения в компонент бензина в течение 72 ч

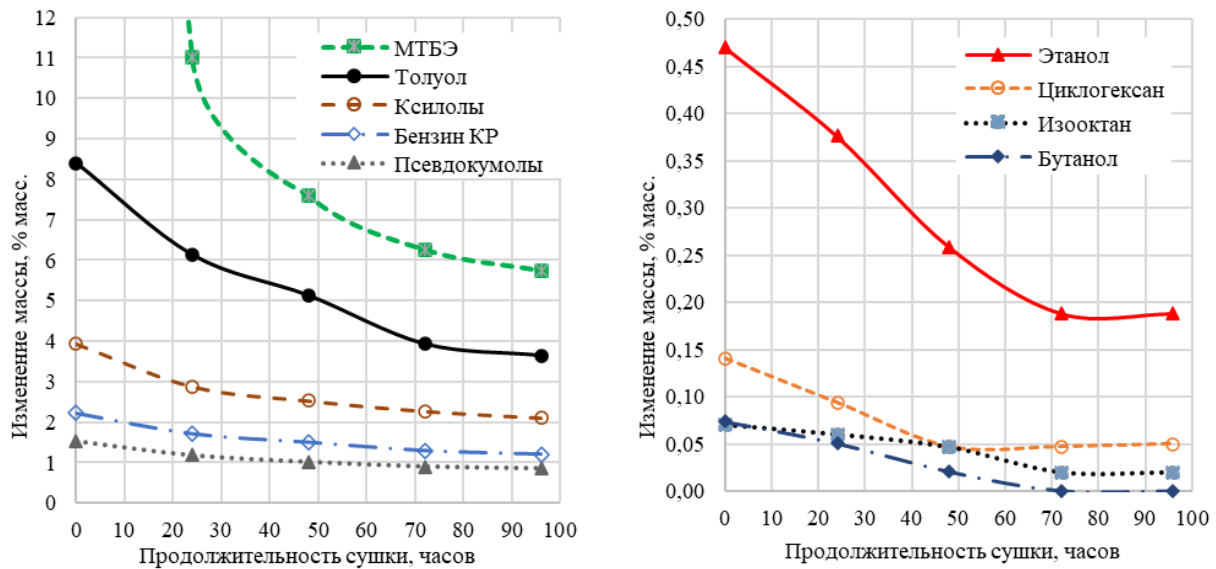


Рисунок 5. – Изменение массы образцов резины FKM при их сушке на воздухе после погружения в компонент бензина в течение 72 ч

Однако МТБЭ и другие использованные в настоящей работе компоненты бензина не способны разрушить исследуемый образец резины из FKM каучука. В процессе сушки образцов из данного типа резины после погружения их в компоненты бензина не было отмечено снижение массы образцов ниже их исходной массы, т.е. меньше нуля (см. рисунок 5).

При этом диффузия и испаряемость МТБЭ и ароматических углеводородов из резины на основе фторкаучука ниже, чем у этанола. Наименьшее воздействие на данный тип резины оказывают циклогексан, изооктан и *n*-бутанол.

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что резина на основе EPDM каучука непригодна для использования в качестве уплотнительных материалов при контакте с такими компонентами бензина, как ароматические углеводороды, бензин каталитического риформинга, циклогексан, изооктан, этиловый и *n*-бутиловый спирты, МТБЭ. Это связано со значительной потерей массы данного типа резины и ее эластичности. Резина из NBR каучука проявляет значительно более высокую устойчивость к воздействию компонентов бензина, чем резина из EPDM каучука. Она склонна к набуханию, особенно в ароматических углеводородах, но также подвержена разрушению под действием компонентов бензина. Наибольшая склонностью

к набуханию при погружении в компоненты бензина содержащие ароматические углеводороды выявлена у резины из HNBR каучука. При этом с увеличением молекулярной массы ароматических углеводородов и, следовательно, размера молекул степень набухания и разрушения ими резины уменьшается. Устойчивость к разрушению у резин из NBR и HNBR каучука данными компонентами бензина примерно одинакова. При этом резины на основе HNBR каучука обладают более высокой устойчивостью к набуханию и разрушению изооктаном и циклогексаном. Наилучшей устойчивостью к воздействию большинства компонентов бензина обладает образец резины на основе фторкаучука. Значительное его набухание отмечается только при контакте с МТБЭ. Признаком разрушения резины на основе FKM каучука при контакте со всеми изученными компонентами автомобильных бензинов не выявлено.

ЛИТЕРАТУРА

1. Варис В.С. Автомобильные эксплуатационные материалы: учеб. пособие. – Саратов: Профобразование, 2024. – 136 с.
2. Касперович А.В., Шашок Ж.С., Вишневецкий К.В. Технология производства резинотехнических изделий: учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-48 01 02 «Химическая технология органических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 02 05 «Технология переработки эластомеров». – Минск: БГТУ, 2014. – 108 с.
3. Воздействие биодизельного и композиционного топлива на резину / С.В. Романцова, Р.Е. Аббасов, И.И. Фролов и др. // Вестник ТГУ. – 2012. – Т.17, вып. 1. – С. 337–338.
4. Гуреев А.А., Азев В.С. Автомобильные бензины. Свойства и применение: учеб. пособие для вузов. – М.: Нефть и газ, 1996. – 444 с.
5. Капустин В.М., Ершов М.А., Хакимов Р.В. Автомобильные бензины с высокооктановыми добавками: учеб. пособие. – М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, 2021. – 160 с.
6. Effects of gasoline with ester additives on the swelling behavior of rubbers / W. Pengfei, Y. He, S. Haiging et al. // China Petroleum Processing and Petrochemical Technology. – 2018. – № 20(1). – P. 44–51.
7. Осовская И.И., Савина Е.В., Левич В.Е. Эластомеры: учеб. пособие. – СПб.: ВШТЭ СПбГУТД, 2016. – 126 с.
8. Корнев А.Е., Буканов А.М., Шевердяев О.Н. Технология эластомерных материалов. – М.: НППА «Истек», 2009. – 500 с.
9. Swelling behavior of rubber in the hydrocarbon liquids. / Q. Zhang, M. He, X. Zheng et al. // Hsi-An Chiao Tung Ta Hsueh / Journal of Xi'an Jiaotong University. – 2014. – № 48(11). – P. 75–80. DOI: 10.7652/xjtuxb201411013
10. Абрамова Н.Л., Зобина М.В., Акопян Л.А. Релаксационные свойства гидрированных бутадиен-нитрильных эластомеров // Каучук и резина. – 2006. – № 6. – С. 5–9.
11. Коровина Ю.В., Щербина Б.И., Долинская Р.М. Пероксидная вулканизация гидрированного бутадиен-нитрильного каучука // Каучук и резина. – 2007. – №1. – С. 4–7.
12. Гидрирование бутадиен-нитрильных каучуков / Б.Ю. Анисимов, А.С. Дыкман, Н.С. Имянитов и др. // Каучук и резина. – 2007. – № 2. – С. 32–38.
13. Лысова Г.А., Донцов А.А. Гидрированные бутадиен-нитрильные каучуки. Свойства. Рецептуростроение. Применение: тематический обзор. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. – 56 с.

Поступила 01.04.2026

RUBBER RESISTANCE TO THE EFFECTS OF AUTOMOTIVE GASOLINE COMPONENTS

V. IVANOV, A. YERMAK, J. ABDUMUMINOV
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

This article presents the results of a study of the influence of gasoline components, such as aromatic hydrocarbons, catalytic reforming gasoline, cyclohexane, isooctane, ethyl and n-butyl alcohols, and MTBE, on rubbers based on EPDM, NBR, HNBR, and FKM rubbers. Patterns of change in the weight of rubber samples under the influence of gasoline components are established. It is shown that EPDM-based rubber is unsuitable for use as sealing materials when in contact with gasoline components due to a significant loss of mass and elasticity of the sample. The resistance of NBR and HNBR rubbers to destruction by aromatic gasoline components is approximately equal. However, HNBR-based rubbers exhibit higher resistance to swelling and destruction by isooctane and cyclohexane. The rubber sample based on fluororubber exhibits the best resistance to the effects of gasoline components. Significant swelling was observed only when immersed in MTBE. No signs of degradation of FKM-based rubber were detected upon contact with any of the studied gasoline components.

Keywords: rubbers, EPDM, NBR, HNBR, FKM, aromatic hydrocarbons, catalytic reforming gasoline, cyclohexane, isooctane, alcohols, MTBE, swelling, weight loss.

ТЕХНОЛОГИИ БОРЬБЫ С НЕФТЯНЫМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В КИТАЙСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКЕ

ЛИ ЦИ

(Хуанганский профессионально-технический институт, провинция Хубэй, КНР)

канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

На основе системного подхода изучены технологии борьбы с нефтяным загрязнением окружающей среды в Китае, детально исследованы методы очистки загрязненных нефтью почв, способы очистки загрязненных водоемов, а также применяемые нефтяные сорбенты. При очистке грунтовых и подземных вод от нефтяных загрязнений широко используются полупроницаемые мембраны, технологии обратного осмоса и сорбционные материалы. Очистка загрязненной нефтью почвы осуществляется при помощи технологий биоремедиации с использованием микроорганизмов, технологий физико-химического восстановления почв, а также комбинирования данных методов. Выполненный анализ позволил определить возможные пути совершенствования технологий борьбы с нефтяным загрязнением, которые направлены на снижение затрат; сокращение цикла очистки; возможности многократного использования реагентов и минимальным образованием не утилизируемых отходов; уменьшение риска вторичного загрязнения; возможности совместного восстановления загрязненной почвы и грунтовых вод; оптимизацию производства эффективных и многофункциональных материалов с широким диапазоном применения в различных условиях окружающей среды; определения механизмов взаимодействия реагентов и сорбентов с поллютантами; увеличение уровня интеллектуализации и роботизации применяемого оборудования с целью повышения безопасности труда работников, осуществляющих очистку поверхности воды и почвы от загрязнений нефтью и нефтепродуктами.

Ключевые слова: нефтяное загрязнение, очистка воды и почвы, биоремедиация, физико-химический метод восстановления, нефтяной сорбент.

Введение. Одной из наиболее быстро развивающихся стран мира в настоящее время является Китайская Народная Республика (КНР), которая занимает второе место по импорту нефти в мире¹. В 2025 г. общее потребление нефти в КНР составило 780 млн т, в т.ч. импорт – 520 млн т. Около 33% потребляемых углеводородов нефти добывается на территории Китая, где разведано около 500 нефтегазовых бассейнов¹. Перспективные месторождения нефти и газа в КНР приведены на рисунке¹.



Рисунок. – Перспективные месторождения нефти и газа в КНР¹

¹ Energy Information Administration. AIR: Advanced Resources International Inc. 2013. – URL: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2013).pdf)

Однако, несмотря на важное значение нефтяной отрасли в экономике Китая, производственные процессы добычи, транспортировки, хранения и переработки нефти вызвали беспрецедентное загрязнение окружающей среды, к примеру, за период с 2024 по 2025 гг. произошло в общей сложности 136 случаев крупных разливов нефти, что привело к загрязнению почв на площади 28 000 га и загрязнению воды на площади 12 тыс. км², что представляет серьезную угрозу для почвенной и водной экосистем. В связи с этим на первый план социального развития КНР поставлено решение проблем контроля и борьбы нефтяным загрязнением окружающей среды.

Нефтяные загрязнители содержат токсичные компоненты, такие как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), бензол и его гомологи, что обусловлено высоким риском для населения. Как в почве, так и в водных объектах ПАУ устойчивы к химической и биологической трансформации и характеризуются высокой миграционной активностью. В водоемах ПАУ сорбируются взвешенными частицами, оседают и накапливаются в донных отложениях, что способствует включению ПАУ в пищевые цепи гидробионтов [1]. Поступление ПАУ в почву вызывает изменение ее физико-химических и биологических свойств, снижение либо полную утрату плодородия. Индивидуальные ПАУ нефтяного генеза, а также продукты их деградации и биотрансформации обладают тройными эффектами: канцерогенными, тератогенными и мутагенными свойствами, оказывающими негативное влияние на природные экосистемы, не только разрушая экологическую среду, но и ставя под угрозу здоровье человека из-за риска попадания в пищевые цепочки [2–5]. Анализ уровня загрязнения почв ПАУ нефтяного генеза в КНР показал, что в некоторых регионах регистрируется превышение допустимых норм, в частности, на северо-западе КНР в провинции Шэньси общий уровень загрязнения почвы по 16 видам ПАУ достигает от 554,10 нг/г (слабозагрязненная почва) до 5516,73 нг/г (сильнозагрязненная почва) [6]. Содержание нефтяных углеводородов в подземных водах на самом крупном нефтяном месторождении КНР – Дацин – составляет в среднем 5,26 мг/л, что значительно превышает предельно допустимые нормы. До 70% загрязнения почвы на нефтяном месторождении Дацин вызвано разливами сырой нефти в процессах ее добычи.

Транспортировка нефтяного сырья также является значительным источником загрязнения экосистем, в среднем регистрируется 1–2 разлива нефти на 100 км китайско-российского нефтепровода. Процессы хранения нефтяного сырья нефтеперерабатывающими и химическими компаниями характеризуются риском утечек около 5–10 т сырой нефти ежегодно.

Кроме того, переработка нефти нефтеперерабатывающими и химическими предприятиями связана с образованием около 1,2 млрд т нефтесодержащих сточных вод, требующих глубокой очистки. Определено, что при использовании нефтепродуктов до 60% городских автозаправочных станций подвержены риску их утечек из резервуаров хранения.

Выполненный анализ зон загрязнения нефти показал региональные особенности распределения их концентрации: значительное загрязнение сырой нефтью преобладает на северо-востоке и северо-западе КНР, где расположены крупные нефтяные месторождения; а в районах нефтепереработки и химической промышленности, таких как дельта реки Янцзы, наблюдается комплексное загрязнение. При этом уровень нефтяного загрязнения на севере Китая выше, чем на юге, а загрязнение подземных вод выше, чем поверхностных.

К концу 2025 г. в Китае общая площадь загрязненных нефтью почв достигала 86 000 га, при этом на долю слабого, умеренного и сильного загрязнения приходится 60,5%, 32,6% и 6,9% соответственно; избыточная доля поверхностных вод, загрязненных нефтью, составит 4,2%, а площадь загрязнения нефтью подземных вод составит 43 тыс. м². Опасный уровень нефтяного загрязнения обуславливает высокий риск экологического ущерба, связанного с деградацией растительности, потерей плодородия почв, гибелью живых организмов; риском повреждения здоровья населения, развитием онкологии, кожных заболеваний, отравлений и серьезных экономических потерь (ежегодное производство сельскохозяйственной продукции сокращается на 5 млрд юаней, а расходы на борьбу с загрязнением превышают 100 млрд юаней).

В настоящее время Китай включил меры по борьбе с нефтяным загрязнением в свою национальную стратегию развития и поставил цели по восстановлению почв на уровне более 85% и соблюдению требований к очистке нефтесодержащих сточных вод на уровне более 98% к концу 2026 г. В связи с этим комплексное исследование доступных и эффективных технологий борьбы с нефтяным загрязнением окружающей среды в КНР является актуальной научной задачей, что и определило *цель настоящего исследования*.

Методы исследования. Применялись теоретические методы исследования (сравнение, классификация, системный анализ и обобщение) достижений ученых в области технологий очистки от нефтяных загрязнений воды и почвы на территории КНР с целью определения границ исследований в этой области и систематизации в контексте технологического развития. Исследование направлено на углубленное изучение трех аспектов: методов очистки загрязненных нефтью почв, способов очистки загрязненных водоемов, а также типов и областей применения нефтяных сорбентов различного происхождения.

Результаты и их обсуждение. Выполненный анализ научных исследований в области разработки эффективных методов очистки загрязненных нефтью почв на примере КНР показал, что они в основном сосредоточены на следующих направлениях: разработке технологий биоремедиации с использованием микроорганизмов, совершенствования технологий физико-химического восстановления почв, а также комбинирования данных методов [6–22]. Для целей микробиологической ремедиации нефтезагрязненных почв наиболее подробно описаны в научной литературе такие высокоэффективные разрушающие штаммы, как *Pseudomonas*

и *Acinetobacter*, выполнен глубокий анализ конечных продуктов метаболизма нефти в почве, изучены ферментативные механизмы. Для целей фиторемедиации научным сообществом проведен отбор сортов растений с высокой устойчивостью к загрязнению и разработаны системы восстановления нефтезагрязненных почв, в частности, водно-болотные растения (такие как тростник и рогоз) широко используются для восстановления водоемов, корневые выделения этих растений стимулируют активность микроорганизмов ризосферы, специализированных бактерий, обеспечивающих синергетическую деградацию нефтепродуктов. Микоризные грибы, ассоциированные с корнями растений, значительно расширяют зону влияния фиторемедиации.

В целом, в области разработки эффективных методов очистки загрязненных нефтью почв в КНР доминирующее положение занимают технологии биоремедиации с использованием микроорганизмов. В частности, Ли Пэйцзюнь и Сунь Тьенг добились серьезных результатов исследований в области биоремедиации и микробиологического восстановления загрязненных нефтью почв в Китае и создали систематизированную теоретическую базу, необходимую для практического использования [14]. Чжу Вэй также предложил способ совершенствования технологии биологической очистки загрязненных нефтью и шламами почв и представил справочные данные для дальнейших исследований в этой области, сформулировал основные принципы и способы практического применения предлагаемой технологии биологической очистки [16]. Использование ресурсов ила при разработке технологии биоремедиации загрязненных нефтью почв занимаются Чжэн Юаньян, Е Вэйминь и Чэнь Юдао, что позволило достичь двойной цели – удалить загрязняющие вещества и осуществить рекуперацию ресурсов [21].

Такие ученые, как Гао Хуан, Цай Мэнменг, Ни Гуаньюань, Дин Кэцян и Ван Лицзин, провели углубленное исследование характеристик проникновения влаги и динамики микробиологической деградации нефтезагрязненной почвы, выявив влияние концентрации загрязняющих веществ, структуры почвы, условий влажности и других факторов на эффективность деградации нефти [6–8].

Ван Хаою, Сюй Дэган, Лю Цзянь и др. использовали методы молекулярной биологии для анализа структуры и эволюции микробных сообществ в загрязненной нефтью почве, что обеспечило теоретическую основу для целенаправленного регулирования микробных сообществ [13; 15]. К примеру, степень очистки при микробиологическом восстановлении почв с 14-дневной скоростью разложения нефтяных углеводородов в деградированной флоре нефтяного месторождения Даганг составляет 96%, при этом при 3-дневной скорости разложения высокоэффективными разрушающими штаммами *Acinetobacter Qiongsi* и *Erythrococcus Qingsheng* составляет 91–92%; а отдельные виды штамма рода *Pseudomonas* в Северной Шэньси помогли увеличить скорость разложения ПАУ до 37,1%.

В области фиторемедиации Жэнь Лэй и Хуан Тинлинь [17] изучали влияние нефтяного загрязнения на рост и развитие растений, а также механизм толерантности растений; Ли Фаньсю, Сяо Яо [20], Чжан Чжэньмин и соавторы [18] и Лю Чжэ [12] добились значительного прогресса в создании совместной системы восстановления растений и микроорганизмов и подобрали комбинацию восстановительных способов, подходящих для различных климатических регионов Китая. Технологии фиторемедиации позволили эффективно разрушить ПАУ и восстановить почву в дельте реки Хуанхэ, при этом скорость деградации составила 77,5% за 80 дней; за 120 дней – 77,8%, что значительно выше, чем при использовании только технологии биоремедиации.

Ряд авторов исследуют особенности восстановления нефтяного загрязнения в солончаково-щелочных районах КНР. Большинство основных районов нефтедобычи в Китае расположены именно в солончаковых районах, которые характеризуются определенными особенностями восстановления загрязненных нефтью почв. Ни Гуаньюань, Нин Вэнь и др. изучили механизм адаптации микроорганизмов к разложению нефтяных углеводородов в условиях соляно-щелочной среды и отобрали высокоэффективные штаммы, устойчивые к воздействию соли и щелочей, которые технически эффективны в борьбе с нефтяным загрязнением в соляно-щелочных районах [5; 15].

В области совершенствования технологий физико-химического восстановления почв исследования сосредоточены на развитии передовых процессов окисления (Advanced Oxidation Processes (AOPs)). В частности, активация персульфатом и метод окисления реактивом Фентона (ЭК-фентон) значительно повысили эффективность удаления труднорастворимых нефтяных углеводородов [11; 23]. В работе Ли Цзя, Цао Синтао и Суй Хун приведен систематический обзор технологии физико-химического восстановления загрязненных нефтью почв в КНР и за рубежом, выполнен анализ применимых условий, преимуществ и недостатков различных технологий [19].

В частности, на нефтяном месторождении Дацин используется физико-химический метод восстановления почв на основе термической десорбции и каталитического пиролиза, который включает обработку в течение 40 мин смесью рамнолипидов и силиката натрия (соотношением 200:700) при 60 °С и дозировкой 1% на сырье; высокотемпературную промывку при 550 °С, центробежное обезвоживание и каталитический пиролиз на оксиде кальция, остаточное содержание нефти менее 3% масс., полный цикл восстановления почвы занимает 20 дней, стоимость данной обработки 1522 юаней за тонну загрязненного сырья [19].

В одной из технологий химического окисления загрязненных почв применен композитный катализатор на основе наночастиц железа и графена для активации персульфатом, содержание нефтепродуктов снижается с 8000 мг/кг до менее чем 100 мг/кг, а стоимость обработки составляет 500 юаней за тонну загрязненного сырья

[19]. Также предложена технология химического окисления нефтезагрязненных почв сочетающая преимущества озона и перекиси водорода, которая обеспечивает удаление ПАУ более чем на 85% [19]. В технологии химического восстановления модифицированный железо-бентонитовый композитный восстановитель обеспечивает 90%-е удаление серосодержащих загрязняющих веществ, стоимость обработки составляет 300 юаней за тонну загрязненного сырья [19].

Другая технология использует метод выщелачивания почвы комплексным реагентом из биологических поверхностно-активных веществ в сочетании с массообменными процессами распыления–замачивания–центрифугирования и обеспечивает содержание нефтепродуктов в умеренно загрязненной почве на нефтяном месторождении Дацин после восстановления на уровне менее 200 мг/кг, а стоимость данной обработки составляет около 50 юаней за 1 м² [19].

Существует технология отверждения и стабилизации нефтезагрязненных почв: норма расхода композитного отвердителя на основе твердых промышленных отходов составляет 92%, а стоимость – 66,7% от стоимости традиционного цементного отвердителя; фиксированная норма расхода композитного стабилизатора на основе отходов агролесомелиорации составляет 88%. Данная технология позволяет повысить плодородие загрязненных почв [19].

Крупнейший в мире по мощности переработчик нефти – китайская компания Sinopec, успешно внедрила комбинированную технологию «Химическое окисление – биологическая синергия», сочетающую как биоремедиацию, так и методы физико-химического восстановления почв для обработки загрязненных участков в реальных условиях провинции Хэнань.

Комбинированные электрохимические окислительные методы обработки (ЕК-ISCO) низкопроницаемых почв характеризуются высокой скоростью удаления нефтяного загрязнения и составляют около 89% за 1 ч обработки. При комбинированной химической окислительно-микробиологической обработке (ISCO-Bio) скорость удаления углеводов увеличивается на 11%; при комбинированной растительно-микробиологической биоуглеродной восстановительной обработке скорость разложения составляет 75%/ в час [19].

Технологии термической обработки (такие как термическая десорбция, пиролиз и сжигание) подходят для быстрой очистки загрязненных нефтью участков почв с высокой концентрацией поллютанта. Однако данные методы требуют значительных энергозатрат и характеризуются высоким риском вторичного загрязнения экосистемы продуктами сгорания и пиролиза. Методы термохимической промывки и коагуляционной обработки применяются при утилизации нефтяных шламов на нефтеперерабатывающих предприятиях Китая.

Анализ доступных технологий очистки загрязненных нефтью водных объектов в Китае показал, что широко используется при очистке грунтовых и подземных вод полунепроницаемые мембраны, технологии обратного осмоса (Osmotic reaction wall, мембранный канал Януса и т.п.) и сорбционные материалы, такие как железо с нулевой валентностью и активированный уголь, наноксиды с высокой удельной поверхностью и реакционной способностью; исследуются новые технологии, в частности, биоэлектрохимические системы, сочетающие разложение органического вещества с выработкой электроэнергии [23–27]. К примеру, использование физического метода разделения углеводов нефтяного генеза и воды технологией обратного осмоса при помощи супергидрофобной и суперолеофильной разделительной мембраны можно достичь эффективности разделения более 99% с расходом загрязненной воды до 5000 л/(м²·ч).

Перспективна технология интегрированной инновационной воздушной флотации – процесса адсорбционно-мембранной фильтрации, который очищает нефтеперерабатывающие и химические нефтесодержащие сточные воды до остаточного содержания углеводов нефтяного генеза менее 0,1 мг/л. Передовая технология химической обработки загрязненных нефтью водных объектов деэмульгаторами обеспечивает степень связывания с ПАУ, бензолом и его гомологами до 90%; при этом степень извлечения нефтепродуктов из осадка с химическим деэмульгатором превышает 75%. Комбинация электропроницаемых реакционных стенок (ЕК-PRB) обеспечивает эффективность удаления углеводов нефтяного генеза более чем на 69,9%; комбинация многофазной экстракции и химического окисления (MPE-ISCO) позволяет снизить концентрацию загрязненных бензолом грунтовых вод до стандартного уровня. Таким образом, электрокомбинированная микробиологическая очистка оказывает значительное влияние на удаление бензола и полициклических ароматических углеводов из водных объектов.

Технологии создания искусственных водно-болотных угодий из загрязненных нефтью водных объектов (морских и прибрежных водоемов) характеризуются низкой стоимостью и хорошими экологическими преимуществами. Отработана технология биологической очистки деградировавшей флоры морских нефтяных месторождений на шельфе залива Бохай, которая обрабатывалась в биопленочном реакторе в искусственных водно-болотных угодьях. Степень разрушения сырой нефти бактериями –нефтедеструкторами в течение 30 дней составила 100% (концентрация нефти в водоеме после очистки менее 0,05мг/л).

Сточные воды нефтеперерабатывающих заводов и нефтесодержащие сточные воды химической промышленности КНР очищаются комбинированными технологическими процессам, зачастую используется четырехступенчатый процесс, включающий последовательные этапы очистки: гравитационное разделение → воздушная флотация → адсорбция → мембранная фильтрация. Такие сточные воды соответствуют стандарту III категории поверхностных вод с коэффициентом повторного использования воды более 80%.

В технологиях ликвидации чрезвычайных ситуаций, связанных с утечками углеводородов нефтяного генеза, как с водной поверхности, так и с почвы широкое распространение получили нефтяные сорбенты [28–30]. В Китае используются различные по природе сорбционные материалы, неорганические сорбенты; органические сорбенты, полученные из биомассы; полимерные сорбенты, нанокompозитные сорбенты и их модификации [31–33]. К примеру, степень удаления нефтяных углеводородов комбинированным сорбентом на основе активированного угля и бентонита составляет 40–80%; адсорбционная способность по отношению к углеводородам нефти летучей золы и стального шлака после модификации составляет 0,3–0,6 г/г; композитные сорбенты на основе твердых промышленных отходов обеспечивают как вторичное использование отходов, так и очистку загрязненной почвы и нефтесодержащих сточных вод. Органические сорбенты, полученные из отходов агролесомелиорации, показывают высокие значения по нефтеемкости: к примеру, адсорбционная способность модифицированных кукурузных стеблей по сырой нефти составляет 15,6 г/г, что на 136,6% выше, чем у не модифицированных отходов обработки кукурузы [31]; адсорбционная способность гидрофобного модифицированного аэрогеля из целлюлозы на основе отходов агролесомелиорации по отношению к сырой нефти составляет 80,2 г/г, по отношению к дизельному топливу – 59,2 г/г и достигает равновесного состояния за 5 мин [33]; адсорбционная способность биоугля из рисовой шелухи, подвергнутой пиролизу, при температуре 450 °С составляет 3,2 г/г; модифицированный лауриновой кислотой сосновый биоуголь достигает краевого угла смачивания с водой 133,5°, а сырая нефть адсорбируется за 60 мин при нефтеемкости 5,3 г/г [33]. Адсорбционная способность нанокompозитных сорбентов на основе графена с магнитными фазами к сырой нефти составляет 0,5–1,2 г/г, при этом благодаря магнитному разделению возможно повторное использование 85% сорбционного материала. Использование на практике обработанного комбинированного сорбента на основе соломы, биоугля, мочевины и райграсса позволило очистить почву в дельте реки Хуанхэ на 77,5% за 80 дней. Органические полимерные сорбенты из углеродных нанотрубок на основе лигнина разлагается при фототермическом воздействии и подходит для ликвидации разливов нефти на море; супергидрофобная олеофильная губка способна поглощает сырую нефть в десятки раз больше, чем ее собственная масса. Модифицированный пенополиуретан способен полностью удалить дизельное топлива с поверхности воды за 6 дней. В целом, эффективность технологии очистки почвы сорбционными материалами в Китае составит 75–98%, нефтесодержащих вод – до 97,8%. Вместе с тем традиционные сорбенты на основе биомассы замещаются нанокompозитными материалами, которые позволят повысить степень очистки воды и обеспечить содержание нефтепродуктов менее 0,1 мг/л.

Заключение. В работе на основе системного подхода изучены технологии борьбы с нефтяным загрязнением окружающей среды в КНР, комплексно исследованы методы очистки загрязненных нефтью почв, способы очистки загрязненных водоемов, а также применяемые нефтяные сорбенты.

Определено, что очистка загрязненной нефтью почвы в основном осуществляется при помощи технологий биоремедиации с использованием микроорганизмов, технологий физико-химического восстановления почв, а также комбинирования данных методов. Технология биоремедиации широко распространена из-за ее низкой стоимости и экологичности. Однако существует ряд ограничений, таких как длительные сроки восстановления загрязненных объектов и значительная зависимость от температуры и других условий окружающей среды.

При очистке грунтовых и подземных вод от нефтяных загрязнений широко используются полупроницаемые мембраны, технологии обратного осмоса и сорбционные материалы. Технологии физико-химического восстановления являются высокоэффективными, но дорогостоящими, и вместе с тем подходят для экстренной обработки сильно загрязненных объектов.

Интеграция и комбинирование различных технологий определяют тенденции развития перспективных методов борьбы с загрязнениями и возможности их технической реализации в промышленных масштабах в условиях КНР. Следует отметить, что неправильный выбор технологии борьбы с нефтяным загрязнением может привести к избыточным капитальным и операционным затратам и вторичному загрязнению окружающей среды.

Выполненный анализ позволил определить возможные пути совершенствования технологий борьбы с нефтяным загрязнением окружающей среды в КНР, которые направлены на снижение затрат; сокращение цикла очистки; возможности многократного использования реагентов и минимальным образованием не утилизируемых отходов; уменьшение риска вторичного загрязнения; возможности совместного восстановления загрязненной почвы и грунтовых вод; оптимизацию производства эффективных и многофункциональных материалов с широким диапазоном применения в различных условиях окружающей среды; определения механизмов взаимодействия реагентов и сорбционных материалов с поллютантами; увеличение уровня интеллектуализации и роботизации применяемого оборудования с целью повышения безопасности труда работников, осуществляющих очистку поверхности воды и почвы от загрязнений нефтью и нефтепродуктами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никаноров А.М., Страдомская А.Г. Проблемы нефтяного загрязнения пресноводных экосистем. – Ростов на/Д: НОК, 2008. – 222 с.
2. Yu H. Environmental carcinogenic polycyclic hydrocarbons: photochemistry and phototoxicity // J. Environ. Sci. Health Part C – Environ. Carcinog. Ecotoxicol. Rev. – 2002. – V. 20 (2). – P. 149–183.

3. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the dissolved phase, particulate matter, and sediment of the Sele River, Southern Italy: a focus on distribution, risk assessment, and sources / P. Montuori, E. De Rosa, F. Di Duca, B. De Simone, S. Scipia, I. Russo, P. Sarnacchiaro, M. Triassi // *Toxics*. – 2022. – V. 10. – 401.
4. PAHs in the surface water and sediments of the middle and lower reaches of the Han River, China: occurrence, source, and probabilistic risk assessment / L. Dong, L. Lin, J. He, X. Pan, X. Wu, Y. Yang, Z. Jing, S. Zhang, G. Yin // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2022. – V. 164. – P. 208–218.
5. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and bottom sediments of a shallow, lowland dammed reservoir (on the example of the reservoir Blachownia, South Poland) / A. Pohl, M. Kostecki, I. Jureczko, M. Czaplicka, B. Łozowski // *Archives of Environmental Protection*. – 2018. – V. 44. – P. 10–23.
6. 高欢. 陕北石油污染土壤中多环芳烃的微生态响应及联合生物修复机制研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2024. Гао Хуан. Исследование микробиологической реакции и комбинированного механизма биоремедиации полициклических ароматических углеводородов в загрязненной нефтью почве на севере провинции Шэньси. – Сиань: Сианьский ун-т архитектуры и технологий, 2024.
7. 蔡蒙蒙. 改性浒苔聚氨酯固定化菌剂在海洋溢油污染中的应用研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2023. Цай Мэнменг. Исследование применения модифицированных полиуретаном бактерий, иммобилизованных на основе *Hu moss*, при загрязнении морской среды разливами нефти. – Циндао: Шаньдунский ун-т науки и техники, 2023.
8. 倪广元. 大庆油田落地油污污染场土壤/地下水修复技术研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2020. Ни Гуанъюань. Исследование технологии восстановления почвы/грунтовых вод на месте нефтяного загрязнения Дацинского нефтяного месторождения. – Дацин: Северо-Восточный нефтяной ун-т, 2020.
9. Adhikari K, Hartemink A E. Linking soils to ecosystem service: a global review // *Geoderma*, 2016.– № 262–P. 101–111.
10. Remediation of soil and water contaminated with petroleum hydrocarbon: a review / I. C. Ossai, A. Ahmed, A. Hassan et al. // *J. Environmental Technology & Innovation*. – 2020. – № 17. – P. 100526.
11. 周慧娣, 等. 石化场地污染土壤和地下水修复技术组合研究与应用进展 [J]. 天津科技大学学报, 2024. Прогресс в исследованиях и применении комбинации технологий восстановления загрязненных почв и грунтовых вод на нефтехимических предприятиях / Чжоу Хуэйди и др. // Журнал Тяньцзиньского университета науки и техники, 2024.
12. 刘喆. 生物炭促进植物修复石油污染土壤的作用机制 [D]. 济南: 山东大学, 2023. Лю Чжэ. Изучен механизм действия биоугля, способствующего фиторемедиации нефтезагрязненной почвы. – Цзинань: Шаньдунский ун-т, 2023.
13. 王浩宇. 石油烃高效降解菌的分离及其强化石油污染土壤修复研究. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022. Ван Хаюю. Исследования по выделению эффективных бактерий, способных разлагать нефтяные углеводороды, и их усилению при рекультивации загрязненных нефтью почв. – Пекин: Китайский ун-т горного дела и технологий (Пекин), 2022.
14. 叶为民, 孙风慧. 2002. 土壤石油污染的生物修复技术. 上海地质, 2002. Ли Пэйцзюнь, Сунь Тьенг. Технология биоремедиации при нефтяном загрязнении почв // Шанхайская геология. – 2002. – № 23(4). – P. 22–24.
15. 许德刚, 李巨峰, 张坤峰. 石油污染土壤修复技术进展 [J]. 生产与环境, 2014. Сюй Дэган, Ли Цзюйфэн, Чжан Куньфэн. Прогресс в технологии восстановления нефтезагрязненных почв // Производство и окружающая среда. – 2014. – № 14. – P. 3–5.
16. 祝威. 石油污染土壤和油泥生物处理技术 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2010. Чжу Вэй. Технология биологической очистки нефтезагрязненных почв и шламов. – Пекин: Sinopec Press, 2010. – P. 5–8.
17. 任磊, 黄廷林. 土壤的石油污染 [J]. 农业环境保护, 2000, Жэнь Лэй, Хуан Тинлинь. Нефтяное загрязнение почвы // Охрана окружающей среды в сельском хозяйстве. – 2000. – № 19(6). – P. 360–363.
18. 张珍明, 林昌虎, 何腾兵, 等. 浅析石油污染土壤的微生物修复研究现状. 贵州科学, 2010. Краткий анализ состояния исследований по микробиологическому восстановлению нефтезагрязненной почвы / Чжан Чжэньмин, Линь Чанху, Хэ Тэнбин и др. // Наука Гуйчжоу. – 2010. – № 28(3). – P. 76–81.
19. 李佳, 曹兴涛, 隋红. 石油污染土壤修复技术研究现状与展望 [J]. 石油学报, 2017. Ли Цзя, Цао Синтао, Суй Хун. Состояние исследований и перспективы технологии восстановления нефтезагрязненных почв // Нефтяной журнал. – 2017. – № 33(5). – P. 812–833.
20. 李凡修, 肖遥. 含油污泥混凝处理实验研究. 石油与天然气化工, 2000. Ли Фаньсю, Сюэ Яо. Экспериментальные исследования по коагуляционной обработке нефтесодержащих шламов // Химическая промышленность нефти и природного газа. – 2000. – № 29(4). – P. 211–213.
21. 郑远扬编译. 石油污染生化治理的进展. 国外环境科学技术, 1993. Чжэн Юаньян. Прогресс в области биохимической очистки нефтяных загрязнений // Зарубежная экологическая наука и техника. – 1993. – № 3 – P. 46–50.
22. Venny, Suyin Gan, Hoon Kiat Ng. Current status and prospects of Fenton oxidation for the decontamination of persistent organic pollutants (POPs) in soils // *Chemical Engineering*. – 2012. – № 213. – P. 295–317.
23. 李照, 等. 海洋溢油污染及修复技术研究进展 [J]. 山东建筑大学学报, 2020. Ход исследований в области технологии ликвидации последствий разливов нефти в море / Ли Чжао и др. // Журнал Шаньдунского университета архитектуры и технологий, 2020.
24. 李云锋. 石油污染水体的治理方法. 环境与发展, 2014. Ли Юньфэн. Методы очистки водных объектов, загрязненных нефтью // Окружающая среда и развитие. – 2014. – № 26(4). – P. 91–94.
25. 张秦川, 王泰旭, 马勇, 等. 生物技术在含油废水处理中的应用研究进展. 科技与企业, 2013. Прогресс в исследованиях по применению биотехнологий для очистки нефтесодержащих сточных вод / Чжан Циньчуань, Ван Тайсю, Ма Юн и др. // Технологии и предпринимательство. – 2013. – № 16. – P. 301.
26. Review of technologies for oil and gas produced water treatment / F. R. Ahmadun, A. Pendashteh, L. C. Abdullah et al. // *Journal of Hazardous Materials*, 2009, – № 170(2/3) – P. 530–551.

27. Increasing intracellular releasable electrons dramatically enhances bioelectricity output in microbial fuel cells / Y. C. Yong, Y. Y. Yu, Y. Yang et al. // *Electrochem Commun.* – 2012. – № 19 – P. 13–16.
28. Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А. Анализ сорбционной способности по отношению к нефти и нефтепродуктам природных растительных материалов // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки.* – 2022. – № 10. – С. 115–120.
29. Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А., Майорова Е.И. Получение сорбента для сбора нефти и нефтепродуктов при их разливах путем утилизации отходов агропромышленного комплекса // *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки.* – 2017. – № 11. – С. 84–89.
30. Bulauka Y.A., Mayorava K.I., Ayoub Z. Emergency sorbents for oil and petroleum product spills based on vegetable raw materials // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2018. – Vol. 451(1). – 012218. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012218
31. 藍舟琳. 玉米秸秆的生物改性及其对石油吸附性能的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013. Лань Чжоулинь. Биологическая модификация стеблей кукурузы и исследование их нефтеадсорбционных свойств. – Гуанчжоу: Южно-Китайский технологический ун-т, 2013.
32. 孙娟, 等. 农林废弃物制备纤维素气凝胶对石油的吸附性能 [J]. *中国石油大学学报 (自然科学版)*, 2025. Адсорбционные свойства целлюлозных аэрогелей, полученных из отходов агролесомелиорации, превращаются в нефть / Сунь Хуан и др. // *Журнал Китайского нефтяного университета (естественно-научное издание)*, 2025.
33. 孙晓军, 等. 生物炭材料在海洋石油类污染修复中的应用研究进展 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 2023. Ход исследований по применению биоуглеродных материалов для ликвидации последствий нефтяного загрязнения на шельфе / Сунь Сяоцзюнь и др. // *Журнал океанологического университета Китая (естественнонаучное издание)*, 2023.

Поступила 29.03.2026

OIL POLLUTION CONTROL TECHNOLOGIES IN THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

LI QI

(Huanggang Polytechnic College, Hubei Province, China)

Y. BULAUKA

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article uses a systems approach to study the technologies for combating oil pollution of the environment in China, and provides a detailed examination of the methods for cleaning oil-contaminated soils, ways of cleaning contaminated water bodies, and the oil sorbents used. Semi-permeable membranes, reverse osmosis technologies, and sorption materials are widely used to clean groundwater and underground water from oil pollution. Oil-contaminated soil is cleaned using bioremediation technologies using microorganisms, technologies for physicochemical restoration of soils, and a combination of these methods. The performed analysis made it possible to identify possible ways to improve the technologies for combating oil pollution, which are aimed at reducing costs; reducing the cleaning cycle; the possibility of repeated use of reagents and minimal formation of non-recyclable waste; reducing the risk of secondary pollution; the possibility of combined restoration of contaminated soil and groundwater; optimization of the production of effective and multifunctional materials with a wide range of applications in various environmental conditions; determining the mechanisms of interaction between reagents and sorbents and pollutants; increasing the level of intellectualization and robotization of the equipment used in order to improve the safety of workers cleaning the surface of water and soil from contamination by oil and oil products.

Keywords: *oil pollution, water and soil purification, bioremediation, physicochemical recovery method, oil sorbent.*

УДК 665.765

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-69-73

АДСОРБЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ДИЗЕЛЬНЫХ ТОПЛИВ ОТ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ

*канд. техн. наук, доц. А.В. СПИРИДОНОВ, канд. техн. наук, доц. Е.В. САФРОНОВА,
д-р техн. наук, проф. С.Г. ЕХИЛЕВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)
PhD, доц. АЛИШЕР ХОШИМ ОГЛИ ТЕМИРОВ,
ДИЁР ХИКМАТУЛЛО ОГЛИ ИЗЗАТОВ
(Бухарский государственный технический университет, Республика Узбекистан)*

Приведено описание адсорбционных методов очистки дизельного топлива от ароматических углеводородов. Установлено, что путем адсорбционной деароматизации дизельного топлива с использованием оптимального сорбента силикагеля КСК-2, селективно активированного на ароматические углеводороды, можно получить дизельное топливо, соответствующее нормам европейской спецификации. Показан промышленный процесс выделения ароматики из различных нефтяных фракций в стационарном слое силикагеля.

Ключевые слова: адсорбция, адсорбционные методы очистки, дизельное топливо, ароматические углеводороды, силикагель, циклогексан, парафины, депарафинизация, экологический стандарт.

Введение. Дизельное топливо играет ключевую роль в мировой транспортной индустрии благодаря своим уникальным химическим и физическим характеристикам, которые делают его незаменимым для множества видов двигателей. Эти свойства влияют на производительность, эффективность и экологическую чистоту транспортных средств.

Химический состав дизельного топлива включает различные углеводороды, в основном алканы, циклоалканы и ароматические углеводороды, с молекулярной массой от C₁₀H₂₀ до C₁₅H₂₈. Эти компоненты способствуют высокой плотности энергии, что обеспечивает высокую эффективность использования дизельного топлива.

Стандарты Евро-3, введенные в начале 2000-х годов, ознаменовали важный шаг в развитии дизельных технологий, ставя акцент на снижение экологического воздействия дизельных двигателей и повышение качества дизельного топлива.

Внедрение стандарта Евро-5 в сентябре 2009 г. значительно повлияло на экологические характеристики дизельных транспортных средств, целеустремленно сокращая выбросы загрязняющих веществ и улучшая качество атмосферного воздуха [1].

Таблица 1 демонстрирует ключевые различия между различными стандартами дизельного топлива и абсорбентом газоконденсатным. Она помогает понять эволюцию экологических стандартов и улучшения, достигнутые в дизельном топливе на протяжении этих изменений.

Таблица 1. – Сравнение Дизельного топлива стандартов Евро-3, Евро-5 и абсорбента газоконденсатного

Характеристика	Евро-3	Евро-4	Евро-5	Абсорбент газоконденсатный
Цетановое число	46-49	48-51	51-55	44-47
Содержание серы (мг/кг)	До 350	До 50	До 10	До 50
Выбросы NO _x (мг/км)	До 500	До 250	До 180	До 250
Выбросы твердых частиц (мг/км)	До 50	До 25	До 5	До 25
Влияние на экологию	Умеренное	Улучшенное	Оптимальное	Улучшенное
Соответствие современным стандартам	Ограниченное	Частичное	Полное	Частичное

Стандарты Евро-3, Евро-4 и Евро-5 постепенно повышали экологические требования, улучшая качество воздуха и сокращая вредные выбросы. Абсорбент газоконденсатный, используемый как добавка, способствует дальнейшему улучшению свойств дизельного топлива, особенно в отношении цетанового числа и эмиссии загрязняющих веществ.

Бухарский нефтеперерабатывающий завод впервые в Узбекистане начал выпуск «экологически чистого и высококачественного» дизельного топлива класса Евро-6. Дизтопливо Евро-6 содержит не более 5 мг/кг (ppm) массовой доли серы и не более 4% массовой доли полициклических ароматических углеводородов [2].

Евро-6 – экологический стандарт, регулирующий содержание вредных веществ в выхлопных газах. В таблице 2 приведены предыдущие экологические стандарты для легковых автомобилей в сравнении с Евро-6 (в г/км).

Таблица 2. – Сравнение экологических стандартов на дизельное топливо

Экологический стандарт	Оксид углерода (II) (CO)	Оксид азота (NOx)	Углерод+NOx	Взвешенные частицы (PM)
Евро-1	2,72 (3,16)	–	0,97 (1,13)	0,14 (0,18)
Евро-2	1,00	–	0,7	0,08
Евро-3	0,64	0,50	0,56	0,05
Евро-4	0,50	0,25	0,30	0,025
Евро-5	0,50	0,18	0,23	0,005
Евро-6	0,50	0,08	0,17	0,005

Адсорбционное выделение *n*-алканов из нефтяных фракций основано на молекулярно-ситовом эффекте цеолитов 5А, который они проявляют по отношению к *n*-алканам, имеющим диаметр молекулы 4,9 А, который меньше, чем диаметр молекул других групп углеводородов, входящих в состав нефтяной фракции.

Основная часть. Адсорбция ароматических углеводородов. Наряду с депарафинизацией дизельного топлива не менее актуальную роль играет деароматизация – снижение концентрации ароматических углеводородов. Ароматика повышает нагарообразование в двигателе, налипание асфальто-смолистых веществ, снижает цетановое число (воспламенительные свойства), что может вызвать затруднение при пуске двигателя в зимний период.

В качестве адсорбента для выделения ароматических углеводородов из дизельного топлива был выбран силикагель. Он является важным материалом для решения задачи использования различных хроматографических методов очистки углеводородов, что позволяет определить индивидуальный состав, провести спектроскопический анализ, а также применить химические и физические методы для удовлетворения исследовательских нужд, особенно при поиске различных компонентов.

Интерес к силикагелю связан с его качественными характеристиками: высокой адсорбционной способностью, селективностью адсорбции, возможностью активного взаимодействия без потери регенерационных свойств, многократным проявлением адсорбционных свойств, высокой стойкостью частиц, термохимической стабильностью, разнообразием гранулированных и порошкообразных форм, а также возможно дешевой получением и др.

Адсорбенты типа силикагеля относятся к анионному типу. В данном случае химическая природа адсорбции носит специфичный характер и оказывает значительное влияние: при взаимодействии отдельных молекул формируются дисперсионные силы, а при взаимодействии адсорбентов общий эффект усиливается.

Силикагель был выбран для разделения смеси углеводородов с ароматическими углеводородами; адсорбция осуществляется с другими классами соединений. На рисунке 1 изображен обычный парафин, бензол и толуол, а также С6–С6 циклопарафины при 150 °С. Бинарные соединения¹ заданы кривой баланса адсорбции. Кривая иллюстрирует адсорбцию бензола *n*-гексаном и циклогексаном (ближайший по строению углеводород имеет схожую молекулярную массу; адсорбция *n*-гексана значительно превосходит адсорбцию *n*-октана и *n*-гексана). Ароматический углеводород в жидкой фазе, вводимый в процессе отбора, также сохраняется в продуктах отбора. Силикагель во многих соединениях широко применяется для анализа адсорбции углеводородов в различных компонентах [3; 4].

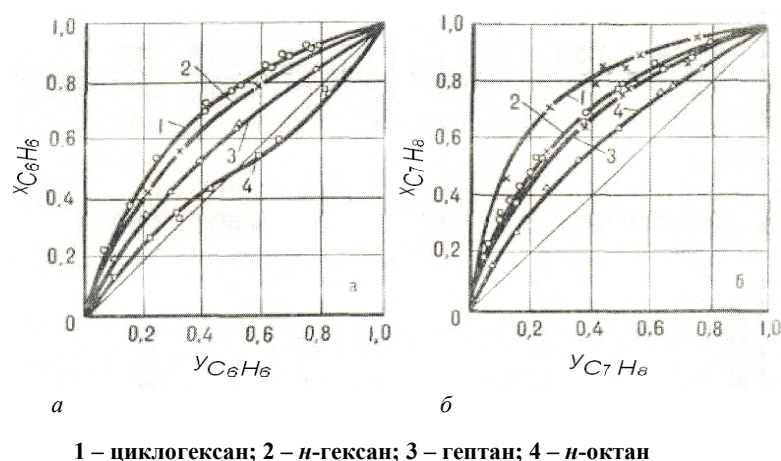
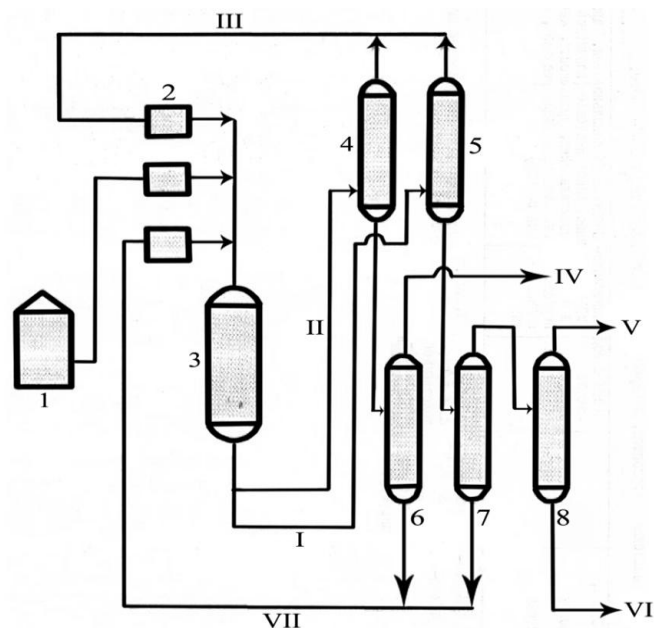


Рисунок 1. – Кривые адсорбционного равновесия смесей бензола (а) и толуола (б) с парафиновыми углеводородами на мелкопористом силикагеле при 150 °С и нормальном давлении

¹ Веремчук М.К. Разделение и каталитические превращения углеводородов на синтетических цеолитах: автореф. дис. ... д-ра хим. наук: / АН СССР, Львов. политех. ин-т. – Львов, 1972.

Промышленный процесс выделения ароматики из различных нефтяных фракций в стационарном слое силикагеля был разработан фирмой «Sun Oil Co» и известен под названием аросорб. На рисунке 2 приведена схема процесса аросорб, предназначенного для выделения ароматических углеводородов.



- 1 – емкость сырья; 2 – осушители потоков; 3 – адсорбер; 4, 5, 6, 7, 8 – ректификационные колонны
 I – ароматический углеводород; II – широкий спектр неароматических углеводородных фракций;
 III – фракция легких углеводородов; IV – неароматические углеводороды; V – бензол; VI – толуол;
 VII – десорбент (в ксилоле)

Рисунок 2. – Схема установки деароматизации нефтяных фракций в стационарном слое силикагеля

Масса силикагеля во взвеси в 10–15 раз превышает массу ароматических углеводородов, подлежащих извлечению. Соотношение всех углеводородов и силикагеля находится в диапазоне соотношений от 2:1 до 1:1. В приведенных ниже данных дано описание количества очищенных продуктов (таблица 3).

Таблица 3. – Описание полученного продукта

Показатель	1-й продукт	2-й продукт
Плотность, кг/м ³	732	785
Температура застывания, °С	24	24
Состав, %		
выход сложных компонентов	96	96
ароматические углеводороды	0,4	0,47
сера	0,01	0,03
Показатель преломления	1,433	1,434
Пределы кипения, °С	268-360	279-356

Ароматические углеводороды определялись с использованием методов адсорбционной способности криоскопической адсорбции (разработки O'Zrfa flour) [5]. Применяемые методы удобны, быстры и точны. Обеспечен высокий уровень доступа к каждому из методов, использующих циклогексан в системе.

Очистка циклогексаном. Для тщательной очистки используется смесь циклогексана. Циклогексан труднее отделить от смесей простыми методами при анализе; требуется переход к растворенному циклогексану, эффективность которого снижается: циклогексан, бензол, метилциклопентан, различные добавки.

Температура кристаллизации продукта наиболее соответствует его критериям чистоты; для циклогексана (100% чистота) она составляет +6,55 °С, что эквивалентно примерно 1 мольному проценту примеси в смеси. Температура кристаллизации циклогексана при этом снижается до 2,43 °С.

Исследование процесса очистки проводится в области концентраций циклогексана (97 мол. %) по критериям его чистоты и сохранения коэффициента кристаллизации (криоскопической константы), что обуславливает необходимость определения температуры.

В работе², а также в монографии [5] приведены данные о применении силикагеля с активированным углем и цеолитов для очистки циклогексана при 6,50 °С до соответствующего температурного режима кристаллизационной адсорбции: адсорбент с активированным углем является наиболее эффективным.

Адсорбенты, предназначенные для отделения ароматических углеводородов от масляных фракций, отличаются высокой механической прочностью и обладают характеристиками, позволяющими использовать их в течение длительного времени. Легко регенерируемая эмульсия, являющаяся инертным химическим веществом и экономически более выгодной по сравнению с отдельными компонентами, должна быть недорогой. Толуол-изооктановая смесь, используемая для разделения адсорбентов, в различных исследованиях активированного угля и оксида алюминия показала, что наиболее крупнопористый силикагель способен проявлять селективность. Силикагель применяется в промышленности для разделения ароматических углеводородов [8].

Разделение ароматических углеводородов и масляной фракции, полученной из газовых конденсатов, представляет собой отдельное направление многолетних исследований, проводимых в области специальных методов обработки данного адсорбента с целью получения крупнопористого силикагеля КС-2.

Данные, полученные по активированному углю для дальнейшей выработки, превышают соответствующие показатели для дизельного топлива, поскольку он обеспечивает деароматизацию на силикагеле согласно евростандарту, его исходная сорбционная способность: 1,45–2,00% по массе соответственно.

По данным А.В. Киселева [7], ионы ароматических углеводородов осаждаются на поверхности адсорбента в виде комплексных соединений под воздействием площади поверхности адсорбента и электростатического электронейтрального дипольного момента, возникающего в результате образования молекулы ароматического углеводорода.

Данные, полученные с использованием активированного материала для работы по евростандарту, оказались более целесообразными.

Дизельное топливо европейских стандартов EN 590, Евро-2 и Евро-3 для Австралии и Японии используется в стандартных количествах в соответствии с установленными нормами. В Швеции и США определяется общее содержание ароматических углеводородов. Таким образом, Швеция специализируется на дизельном топливе, которое подразделяется на топливо 1-го и 2-го классов. Ароматическое топливо 1-го класса составляет 5% от объема ароматического топлива 2-го класса, при этом достигается 20%. Европейский стандарт на дизельное топливо EN 590 (Евро-2, Евро-3), Евро-4, Евро-5 определяет общее количество ароматических углеводородов, однако политика по ароматическим углеводородам (PAU) устанавливает их уровень [8].

В данной статье представлен опыт работы с дизельным топливом Бухарского НПЗ по улучшению качества адсорбции методом деароматизации [9; 10]. Как известно [11], существуют отдельные методы получения различных ароматических углеводородов: азеотропное вытеснение, экстрактивное вытеснение и адсорбция. В качестве более простого, дешевого и универсального метода для выделения дизельного топлива была выбрана адсорбция.

Заключение. Адсорбция ароматических углеводородов в дизельном топливе посредством деароматизации позволяет снизить содержание полициклических соединений, обеспечить низкую токсичность продуктов сгорания, улучшить его экологические свойства, а также уменьшить количество сажи. Таким образом количество оксидов серы и азота снижается на 15%, увеличивается цетановое число дизельного топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ароматические углеводороды дизельных топлив / Т.Н. Митусова, Е.Е. Сафонова, Л.В. Бармина и др. // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2005. – № 4. – С. 15–16.
2. Зегер К.Е., Котлер В.Р. Получение дизельного топлива с улучшенными экологическими характеристиками // ХТТМ. – 1996. – № 6. – С. 25–27.
3. Mair V. J., Rossini F. D. Composition of Lubricating Oil Portion of Petroleum // Ind. Eng. Chem. – 1955. – № 47(5). – P. 1062–1068. DOI: 10.1021/IE50545A050
4. Россини Ф. Д., Мэйр Б. Дж., Стрейф А. Дж. Углеводороды нефти: Разделение, анализ, выделение, очистка и свойства нефт. углеводородов / пер. с англ. Ю.А. Бедова и др.; под ред. проф. С.Р. Сергиенко. – Л.: Гостоптехиздат. Ленингр. отд-ние, 1957. – 470 с.
5. Рябова Н.Д. Адсорбенты для светлых нефтепродуктов. – Ташкент: ФАН, 1975. – 144 с.
6. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – М.: Химия, 1976. – 448 с.
7. Иониты и ионный обмен: сб. ст. / Акад. наук СССР; отв. ред. акад. А.В. Киселев. – М.: Наука, 1966. – 188 с.: ил.
8. Емельянов В.Е., Туровский Ф.В. Снижение вредных выбросов автотранспорта // Экология и промышленность России. – 2001. – № 1. – С. 4–5.
9. Адсорбционная деароматизация дизельного топлива / Н.Ш. Мухтаров, Б.Н. Хамидов, М.М. Мирзаева и др. // Узбекский журнал нефти и газа. – 2009. – № 2. – С. 41–43.

² Адылова Т.Т. Адсорбционно-криоскопический метод определения группового состава нефтепродуктов: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.11. – Ташкент, 1964. – 24 с.

10. Шарипов К.К. Дизельное топливо улучшенного качества. Ёш олимларнинг «Юкори технологик ишланмалар ишлаб чиқариш» мавзуидаги илмий-амалий анжумани. – Тошкент, 2010. – С. 82–84.
11. Сулимов А.Д. Выделение ароматических углеводородов из нефтяного сырья. – М.: Гостоптехиздат, 1959. – 61 с. – (Новая техника нефтяной промышленности).

Поступила 03.04.2026

ADSORPTION METHODS FOR PURIFYING DIESEL FUELS FROM AROMATIC HYDROCARBONS

A. SPIRIDONOV, E. SAFRONOVA, S. EKHILEVSKII
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)
ALISHER KHOSHIM OGLI TEMIROV, DIYOR HIKMATULLO OGLI IZZATOV
(*Bukhara State Technical University, Republic of Uzbekistan*)

This article describes adsorption methods for removing aromatic hydrocarbons from diesel fuel. It is shown that adsorption dearomatization of diesel fuel using the optimal silica gel sorbent KSK-2, selectively activated for aromatic hydrocarbons, can produce diesel fuel that meets European specifications. An industrial process for separating aromatics from various petroleum fractions in a fixed-bed silica gel is demonstrated.

Keywords: *adsorption, adsorption purification methods, diesel fuel, aromatic hydrocarbons, silica gel, cyclohexane, paraffins, dewaxing, environmental standard.*

УДК 661.29:547.279.3

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-74-83

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДИМЕТИЛДИСУЛЬФИДА ИЗ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ
ВТОРИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЯНОГО СЫРЬЯ БЕЛОРУССКОГО НПЗ**

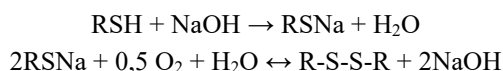
*д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА,
П.Н. ПЛИСКИН*

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Представлены результаты моделирования химико-технологического процесса извлечения ценного серосодержащего соединения из побочного продукта установки очистки сжиженных углеводородных газов от меркаптанов окислением в присутствии катализаторного комплекса – дисульфидного масла, для условий белорусского НПЗ с получением в качестве целевого продукта диметилдисульфида, широко востребованного реагента в нефтепереработке и нефтехимии. Подобрано требуемое технологическое оборудование и определены его оптимальные рабочие параметры с целью выпуска товарного продукта марки А высокой степени чистоты 99,5% масс., при глубине извлечения диметилдисульфида из дисульфидного масла на уровне 99,72% масс. и производительности по целевому продукту около 100 т/год, что на 50% обеспечит требуемый годовой объем потребления в Республике Беларусь и наполовину решит проблему импортозамещения. Производство на белорусском НПЗ диметилдисульфида с использованием сырья неквалифицированного применения позволит расширить ассортимент белорусских химических реагентов и получить экономический эффект.

Ключевые слова: *химико-технологический процесс, дисульфидное масло, диметилдисульфид, моделирование, нефтепереработка, нефтехимия, импортозамещение.*

Введение. Направления совершенствования технологических процессов углубления и переработки нефти, повышения качества товарных нефтепродуктов, в т.ч. с получением из них ценных соединений¹ [1–16]. В частности, на блоке очистки сжиженных углеводородных газов от меркаптанов белорусского НПЗ образуются более 400 т/год побочного серосодержащего продукта – дисульфидного масла (ДСМ), состоящего из низкомолекулярных диалкилдисульфидов, обезвреживание которых сопровождается высоким риском нарушения режима гидрогенизационных процессов на НПЗ [4; 5]. В основе образования побочного продукта (диалкилдисульфидов) лежит каталитическая реакция окисления меркаптидов натрия кислородом воздуха до дисульфидов в процессе регенерации щелочного раствора катализаторного комплекса. При этом протекают следующие основные реакции [4; 5; 13]:



Как видно из приведенных выше реакций, побочным продуктом процесса является смесь органических диалкилдисульфидов R-S-S-R (диметилдисульфида (ДМДС), метилэтилдисульфида (МЭДС), диэтилдисульфида (ДЭДС) и др.), не производимых в Республике Беларусь и ежегодно закупаемых за рубежом. Годовой объем потребления только диметилдисульфида в Республике Беларусь составляет около 200 т, а в России – около 2000 т [4; 5]. Наиболее перспективным к извлечению из дисульфидного масла компонентом является диметилдисульфид, который является ценным химическим реагентом и широко используется¹ [1–16]:

– в нефтепереработке: для активации катализаторов гидрогенизационных процессов – гидроочистки и гидрокрекинга, гидродисульфуризации и других (для перевода активных центров из оксидной формы в сульфидную), выступая сульфидирующим агентом для осернения катализаторов, имеющих низкую температуру разложения на CoMo, NiMo, NiW и т.п.; использование ДМДС в нефтепереработке значительно уменьшает время выхода установок на режим, при этом увеличивается начальная активность катализатора и цикл между регенерациями установок;

– в нефтехимии в качестве ингибитора коксообразования в змеевиках печей пиролиза, увеличивая межремонтный пробег печей пиролиза и выход олефинов; для удаления отложений в теплообменном оборудовании и оборудовании для разделения продуктов;

– в металлургии – для борьбы с коррозией;

– в прочих процессах: как одорант природного газа (нижний порог раздражающего действия – 110 мг/м³); как тиометилирующий агент в органическом синтезе; как промежуточный продукт при производстве инсектицидов и др.

¹ Патент на изобретение RU 2622046 C1. Способ получения диалкилдисульфидов: № 2016127119; заявлено 05.07.2016 / Машкина А.В., Хайрулина Л.Н. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2622046C1/ru> (дата обращения: 02.04.2026).

Анализ дисульфидного масла, производимого на белорусском НПЗ, показал, что его основными компонентами являются: 26–30% масс. диметилдисульфида, 43–46 % масс. Метилэтилдисульфида и 24–26% масс. диэтилдисульфида; суммарное содержание алкилдисульфидов составляет около 98% масс.

В таблице 1 приведены требования к показателям качества товарного продукта ДМДС марок А и Б, а также некоторые фактические свойства для дисульфидного масла белорусского НПЗ.

Таблица 1. – Требования к показателям качества товарного продукта, а также фактические свойства побочного продукта

Показатель	Дисульфидное масло (фактическое значение)	ДМДС марка А	ДМДС марка Б
Содержание ДМДС, % масс., не менее	26,95	99,5	99,0
Содержание метилмеркаптана, % масс., не более	–	0,1	0,1
Содержание серы, % масс., не менее	65,5	68,0	68,0
Плотность при 20°С, г/см ³	1,045	1,050–1,070	1,050–1,070
Содержание воды, ppm, не более	300	600	600

Основными производителями диметилдисульфида являются такие компании, как: Arkema France S.A., Chevron Phillips Chemicals Company, ООО «Газпром добыча Оренбург», Acros Organics B.V.B.A., Alfa Aesar, Johnson Matthey Company, Finetech Industry Limited, 3WAY PHARM INC., Tokyo Chemical Industry Co., Ltd., Shandong Taihe Chemicals и др. Аналитики прогнозируют среднегодовой темп роста мирового рынка диметилдисульфида на уровне 5%. В Республике Беларусь ДМДС не производится, закупается за рубежом по цене до 4500 долл. США за 1 т.

В связи с этим исследования по извлечению из побочных продуктов нефтепереработки высоколиквидного продукта – диметилдисульфида – с доведением его до товарной формы является актуальным научным направлением, что и определило *цель настоящего исследования*.

Методы исследования. Выполнено моделирование химико-технологического процесса выделения диметилдисульфида из дисульфидного масла для условий белорусского НПЗ при помощи математических методов, системного анализа и информационных технологий, а именно: программного моделирующего пакета UniSim Design R460.1, в т.ч. модуля расчета пластинчатых теплообменников UniSim Design PHE R460.1 и модуля расчета кожухотрубчатых теплообменников UniSim Design STE R460.1.

Результаты и их обсуждение. Технологический процесс производства товарного диметилдисульфида предполагает внедрение трех дополнительных операций с расширением существующего производства: осушки сырья (дисульфидного масла), ректификации сырья и отгрузки товарного продукта – диметилдисульфида. Схемы основных расчетных моделей химико-технологического процесса выделения диметилдисульфида из дисульфидного масла для условий белорусского НПЗ приведены на рисунках 1–4.

Описание предлагаемой технологической схемы химико-технологического процесса выделения диметилдисульфида из побочного продукта установки очистки сжиженных углеводородных газов от меркаптанов для условий белорусского НПЗ следующее: дисульфидное масло от центробежных насосов 802-P08/A, В установки поступает в резервуар Р-1 блока выделения ДМДС. Из резервуара Р-1 насосами Н-1/А, Б дисульфидное масло подается в адсорбер А-1/А (А-1/Б), в котором по мере прохождения сквозь слой адсорбента сверху вниз происходит удаление из дисульфидного масла следовых количеств раствора катализаторного комплекса, углеводородов и воды (остаточное содержание в ДСМ 0,03% масс.) с использованием в качестве осушителя активного угля. Регенерация активного угля не предусматривается ввиду ее высокой стоимости и низкой эффективности данного процесса – экономически выгоднее производить замену адсорбента на новый. Срок службы адсорбента составляет около 3 месяцев и уточняется в процессе эксплуатации. Далее очищенное сырье через сетчатый жидкостной фильтр Ф-1/А (Ф-1/Б), предназначенный для улавливания механических примесей в виде угольной пыли, направляется в рекуперативный пластинчатый теплообменник Т-1, где подогревается за счет тепла фракции тяжелых дисульфидов, подаваемых насосами Н-3/А, Б из куба колонны К-1, после чего поступает в среднюю часть колонны К-1 на 3-й сверху пакет нерегулярной насадки.

В колонне К-1 предполагается разделение дисульфидного масла на диметилдисульфидную фракцию (ДМДС) с высокой степенью чистоты товарного продукта марки А (99,5% масс. основного компонента), отбираемую из емкости орошения в качестве целевого продукта, и фракцию тяжелых дисульфидов, отбираемых из куба колонны. В колонне предполагается размещение 4 пакетов нерегулярной металлической насадки типа колец Палля, на которых происходит фракционирование за счет контакта паров, поднимающихся вверх по колонне, со стекающей вниз жидкой флегмой. Пары с верха колонны К-1 конденсируются в водяном кожухотрубчатом холодильнике-конденсаторе ХК-1 и поступают в емкость орошения Е-1. Из рефлюксной емкости Е-1 насосами Н-2/А, Б фракция ДМДС подается на орошение в колонну К-1 на верхний (1-й) пакет насадки; балансовое количество фракции ДМДС от насосов Н-2/А, Б поступает в резервуар хранения ДМДС Р-2.

Откачка фракции ДМДС из резервуара Р-2 потребителям осуществляется насосами Н-4/А, Б.

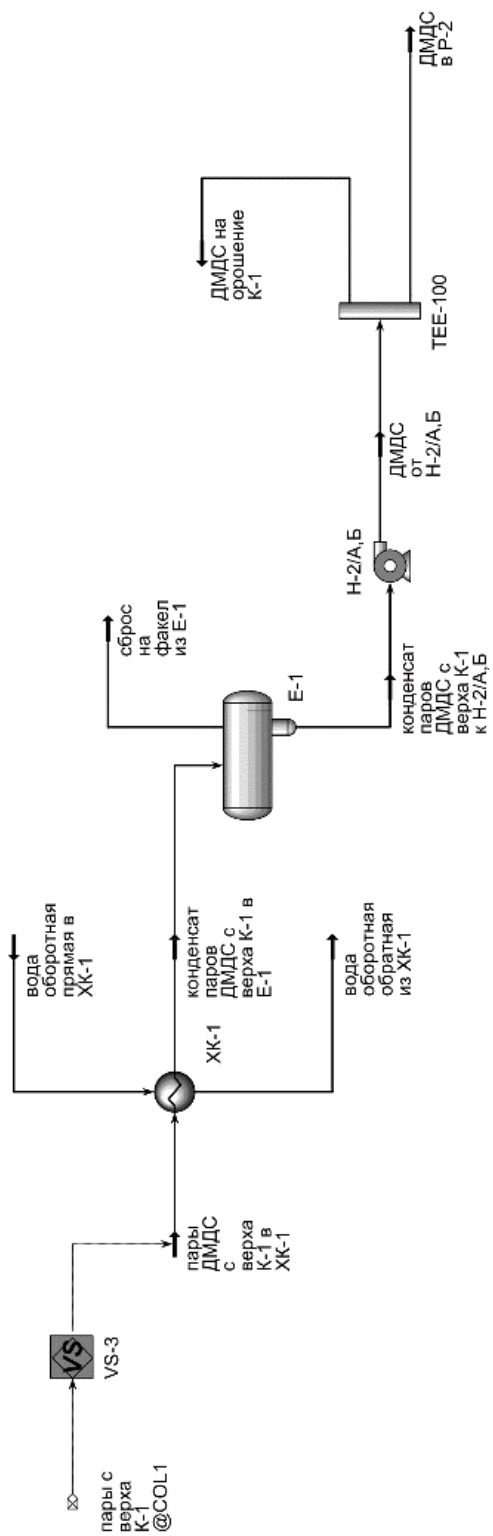


Рисунок 2. – Схема расчетной модели конденсации паров с верха колонны К-1

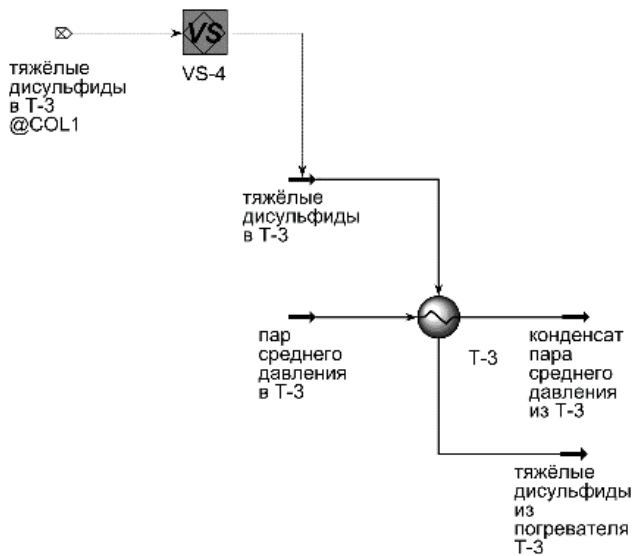


Рисунок 3. – Схема расчетной модели подогревателя Т-3

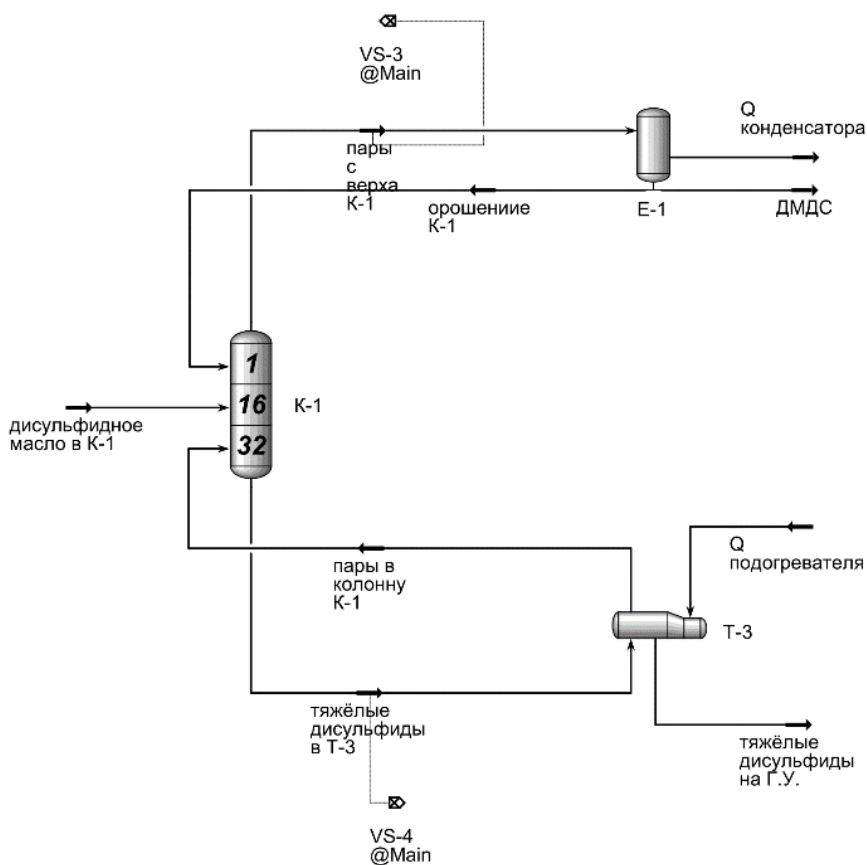


Рисунок 3. – Схема расчетной модели колонны К-1

Фракция тяжелых дисульфидов из куба колонны К-1 поступает в межтрубное пространство ребойлера Т-3, где частично испаряется за счет тепла водяного пара, поступающего в трубное пространство указанного аппарата. В качестве теплоносителя для подвода тепла в куб колонны К-1 через подогреватель Т-3 предполагается использовать пар среднего давления ($P_{РАБ} = 1$ МПа изб., $t_{РАБ} = 185$ °С). Пары из парового пространства ребойлера Т-3 возвращаются в колонну К-1 под нижний (4-й) пакет насадки. Жидкая фаза из ребойлера Т-3 насосами Н-3/А,Б подается в рекуперативный теплообменник Т-1, где охлаждается, отдавая тепло потоку сырья – дисульфидного масла, затем – в пластинчатый водяной холодильник Т-2, где охлаждается до температуры не выше 40 °С, и поступает в резервуар хранения фракции тяжелых дисульфидов Р-3. Из резервуара Р-3 фракция тяжелых дисульфидов насосами Н-5/А,Б подается в линию вакуумного дизельного топлива, поступающего на установки гидроочистки. Хранение дисульфидного масла, фракции ДМДС и фракции тяжелых дисульфидов в резервуарах Р-1, Р-2, Р-3 соответственно предполагается осуществлять под азотной подушкой (под избыточным давлением 2,0 кПа) (после кланов-регуляторов из линии азота низкого давления установки). Технологической схемой предусмотрен обогрев резервуаров Р-1, Р-2, Р-3 для поддержания температуры внутри них не менее +5 °С в холодный период.

При норме рабочего времени установки 8000 ч/год требуемый объем резервуара Р-1 для хранения годового запаса дисульфидного масла составит 400 м³ (с учетом коэффициента заполнения, равного 0,8). Для хранения дисульфидного масла принят стальной вертикальный резервуар номинальным объемом 500 м³ диаметром 8500 мм и высотой 9000 мм. Средний подпор на линии всасывания насосов Н-1/А,Б принят по высоте столба жидкости при 50%-м заполнении (взливе) равным 52,0 кПа с учетом давления азотной подушки.

Предполагается работа блока выделения ДМДС из дисульфидного масла продолжительностью 1 месяц в году, с часовой производительностью блока 0,528 м³/ч. Температура оборотной воды на входе в водяной холодильник Т-2 и водяной холодильник-конденсатор ХК-1 принята равной 28 °С (летний период), избыточное давление – 400 кПа. Расчет рекуперативного теплообменника Т-1 выполнен для зимнего периода, расчет водяного холодильника Т-2 и водяного холодильника-конденсатора ХК-1 – для летнего. Избыточное давление на нагнетании насосов Н-1/А,Б принято равным 550 кПа для преодоления гидравлического сопротивления трубопроводов, адсорберов А-1/А,Б, фильтров Ф-1/А,Б и рекуперативного теплообменника Т-1. Избыточное давление на нагнетании насосов Н-2/А,Б принято равным 500 кПа для преодоления гидравлического сопротивления трубопроводов. Избыточное давление на нагнетании насосов Н-3/А,Б принято равным 450 кПа для преодоления гидравлического сопротивления трубопроводов, рекуперативного теплообменника Т-1 и водяного холодильника Т-2. Избыточное давление на нагнетании насосов Н-4/А,Б, Н-5/А,Б принято равным 1000 кПа для преодоления гидравлического сопротивления трубопроводов, в т.ч. межцеховых. Перепад давления между потоками в пластинчатых теплообменниках Т-1, Т-2 не должен превышать 50–100 кПа, что также определяется принятыми значениями давления на линии нагнетания указанных насосов. В рамках модели блока насосы Н-1/А,Б, Н-2/А, Н-3/А,Б, Н-4/А,Б, Н-5/А,Б рассчитаны как центробежные с КПД в рабочей точке, равным 60%. Вследствие малых расходов перекачиваемых сред при реализации схемы предполагается использование мембранных насосов, обеспечивающих определенные расчетом параметры перекачиваемых сред. При расчете колонны К-1 в качестве спецификаций заданы: температура в емкости орошения Е-1 – 40 °С; содержание ДМДС в верхнем продукте (дистилляте) – 99,5% масс.; содержание ДМДС в кубовом продукте (остатке) – 0,1% масс. Температура дисульфидного масла на входе в колонну К-1 принята равной 70 °С. Избыточное давление в конденсаторе принято равным 100 кПа. Перепад давления на линии конденсации, по высоте колонны и подпор столба жидкости из куба колонны К-1 в подогреватель приняты равными 5 кПа. Избыточное давление в кубе колонны К-1 предварительно принято равным 110 кПа. К расчету принята схема полной конденсации паров с верха колонны К-1 ввиду предполагаемого отсутствия в сырье компонентов, не конденсирующихся при рабочих условиях емкости орошения Е-1. Для оценки вариантов работы колонны К-1 произведена серия расчетов с помощью элемента shortcut по уравнениям Фенске–Андервуда с различным количеством теоретических ступеней и кратностью орошения в интервале 3...6 при фиксированных требованиях к качеству получаемых продуктов.

Результаты подбора числа ступеней разделения дисульфидного масла в колонне К-1 представлены в таблице 2.

Таблица 2. – Результаты подбора числа ступеней разделения дисульфидного масла в колонне К-1

Параметр	Количество ступеней, шт.					
	28	30	32	34	36	38
Ступень подачи сырья	14	15	16	17	18	19
Требуемая кратность орошения	6,558	5,300	4,513	3,974	3,595	3,314
Содержание ДМДС в дистилляте, % масс.	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5
Содержание ДМДС в кубовом продукте, % масс.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Тепловая нагрузка конденсатора, кДж/ч	573471	477978	418309	377433	348639	327345
Тепловая нагрузка подогревателя, кДж/ч	638294	542770	483124	442240	413449	39215

Наиболее оптимальным с точки зрения количества ступеней (соответственно, габаритов и металлоемкости колонны) и затрат на фракционирование принят вариант с 32 ступенями. В качестве контактных устройств в колонне К-1 приняты 4 слоя нерегулярной металлической насадки «кольца Палля» типоразмера 1” (25,0 мм). Нумерация слоев – сверху вниз. Подача сырья осуществляется в среднюю часть колонны К-1 на 3-й слой насадки. Расчетная высота, эквивалентная теоретической тарелке (ступени) (ВЭТТ), для колец Палля типоразмера 1” (25 мм) верхнего (1-го) слоя составляет 0,4156 м, 2-го слоя – 0,4272 м, 3-го слоя – 0,4438 м, 4-го слоя – 0,4495 м. Таким образом, расчетная высота 1-го слоя составляет 3,4 м, 2-го – 3,4 м, 3-го – 3,6 м, 4-го – 3,6 м.

Результаты расчета ректификационной колонны К-1 представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Результаты расчета ректификационной колонны К-1

Параметр		Ед. изм.	Значение
Расход	Дисульфидное масло в К-1	кг/ч	570,032
		м ³ /ч {1}	0,574
	Пары с верха колонны К-1	кг/ч	833,778
		м ³ /ч {1}	139,441
	Орошение в К-1	кг/ч	682,535
		м ³ /ч {1}	0,659
	ДМДС (балансовое количество в Е-2)	кг/ч	151,243
		м ³ /ч {1}	0,146
	Кубовый продукт (тяжелые дисульфиды) в подогреватель Т-3	кг/ч	1928,019
		м ³ /ч {1}	2,183
Пары из Т-3 под нижний слой насадки	кг/ч	1509,230	
	м ³ /ч {1}	223,025	
Кубовый продукт (тяжелые дисульфиды) к Н-3/А,Б	кг/ч	418,789	
	м ³ /ч {1}	0,477	
Давление	Дисульфидное масло в К-1	кПа (изб.)	570,0
	Пары с верха колонны К-1	кПа (изб.)	105,0
	Орошение в К-1	кПа (изб.)	100,0
	ДМДС (балансовое количество в Е-2)	кПа (изб.)	100,0
	Кубовый продукт (тяжелые дисульфиды) в подогреватель Т-3	кПа (изб.) {2}	115,0
	Пары из Т-3 под нижний слой насадки	кПа (изб.)	110,0
	Кубовый продукт (тяжелые дисульфиды) к Н-3/А,Б	кПа (изб.)	110,0
Температура	Дисульфидное масло	°С	70,0
	Пары с верха колонны К-1	°С	137,143
	Орошение в К-1	°С	40,0
	ДМДС (балансовое количество в Е-2)	°С	40,0
	Кубовый продукт (тяжелые дисульфиды) в подогреватель Т-3	°С	168,312
	Пары из Т-3 под нижний слой насадки	°С	169,506
	Кубовый продукт (тяжелые дисульфиды) к Н-3/А,Б	°С	169,506
Кратность верхнего (острого) орошения		–	4,513
Кратность парового орошения		–	3,603
Тепловая нагрузка конденсатора (ХК-1)	кДж/ч	418274	
	кВт	116,187	
Тепловая нагрузка подогревателя (Т-3)	кДж/ч	483099	
	кВт	134,194	

{1} фактический объёмный расход в рабочих условиях

{2} с учетом подпора столба жидкости

Гидравлическая характеристика внутренних устройств колонны К-1 представлена в таблице 4.

Таблица 4. – Гидравлическая характеристика колонны К-1

Параметр	Секция (слой насадки)			
	1	2	3	4
Расчетный минимальный диаметр секции, м	0,4572	0,4572	0,4572	0,4572
Расчетная высота, м	3,324	3,418	3,550	3,596
Расчетный фактор захлебывания, %	27,00	34,67	35,71	35,94
Расчетный перепад давления, кПа	0,194	0,326	0,359	0,368
Отношение диаметр кольца (25 мм) / диаметр секции	18,288	18,288	18,288	18,288
Отношение высота насадки / диаметр секции	7,270	7,476	7,765	7,865

Анализ гидравлических характеристик внутренних устройств колонны К-1 позволил определить расчетный диаметр колонны, который составил 457,2 мм (ближайший больший номинальный диаметр – 500 мм). Расчетная высота колонны составила 17,0 м с учетом юбки, эллиптических днищ и распределительных устройств.

Аналитическому контролю подлежит значение концентрации 99,5% масс. диметилдисульфида в дистилляте и 0,1% масс. диметилдисульфида в составе кубового продукта (фракция тяжелых дисульфидов). Фактический перепад давления по высоте колонны составил 1,247 кПа. Расчетная глубина извлечения ДМДС из дисульфидного масла – 99,72% масс.

В качестве рекуперативного теплообменника Т-1 предполагается использовать теплообменный аппарат пластинчатого типа из нержавеющей стали. Результаты проектного расчета пластинчатого теплообменника Т-1 позволили установить его основные характеристики: коэффициент теплопередачи – 458 Вт/(м²·К); тепловая нагрузка – 15,37 кВт; размеры пластины – не менее 563,5×132,5 мм; количество пластин – 7; площадь пластины – 0,0747 м²; суммарная площадь теплообменной поверхности – 0,52 м²; среднелогарифмическая разность температур – 85 °С. По потоку тяжелых дисульфидов гидравлическое сопротивление составило 2,01 кПа, максимальная скорость потока – 0,11 м/с; по потоку дисульфидного масла гидравлическое сопротивление составило 3,33 кПа, максимальная скорость потока – 0,14 м/с.

В качестве водяного холодильника Т-2 также предполагается использовать теплообменный аппарат пластинчатого типа из нержавеющей стали. Результаты проектного расчета пластинчатого теплообменника Т-2 позволили установить его основные характеристики: коэффициент теплопередачи – 597 Вт/(м²·К); тепловая нагрузка – 10,08 кВт; размеры пластины 433,5 × 132,5 мм; количество пластин – 13; площадь пластины – 0,0574 м²; площадь теплообменной поверхности 0,75 м², запас теплообменной поверхности 1,2%; среднелогарифмическая разность температур – 27 °С. По потоку тяжелых дисульфидов гидравлическое сопротивление составило 2,99 кПа, максимальная скорость потока – 0,1 м/с; по потоку оборотной воды гидравлическое сопротивление составило 3,63 кПа, максимальная скорость потока – 0,15 м/с.

В качестве подогревателя Т-3 предполагается использовать испаритель с паровым пространством (рибойлер) из нержавеющей стали с трубным пучком DN300 с U-образными трубами, длиной прямого участка, равной 3,5 м, и диаметром корпуса 800 мм. Размеры теплообменных труб: наружный диаметр – 25 мм, толщина стенки – 2,5 мм, шаг расположения в трубной решетке – 32 мм, способ расположения в трубной решетке – по вершинам квадрата (45°). Результаты проектного расчета рибойлера Т-3 позволили установить его основные характеристики: коэффициент теплопередачи – 695,4 Вт/(м²·К); тепловая нагрузка – 134,19 кВт; минимальная площадь теплообменной поверхности (по прямым участкам теплообменных труб) – 11,35 м²; среднелогарифмическая разность температур – 15,5 °С. По межтрубному пространству (фракция тяжелых дисульфидов) гидравлическое сопротивление составило 2,39 кПа, максимальная скорость потока – 0,16 м/с; по трубному пространству (пар среднего давления / конденсат пара среднего давления) гидравлическое сопротивление составило 0,11 кПа, максимальная скорость потока – 1,58 м/с. Требуемый расход пара среднего давления в трубное пространство испарителя Т-3 составил 201,1 кг/ч.

Для конденсации и охлаждения паров с верха колонны К-1 предполагается использовать вертикальный кожухотрубчатый жесткотрубный водяной холодильник-конденсатор ХК-1 с линзовым компенсатором на корпусе. Материальное исполнение теплообменных труб, распределительной камеры и трубной решетки – нержавеющая сталь, материал корпуса – углеродистая сталь. Конструкция аппарата: одноходовой с условным диаметром корпуса 300 мм; длина прямого участка труб – 2,5 м; наружный диаметр труб – 25 мм; толщина стенки труб – 2,5 мм; шаг расположения труб в трубной решетке – 32 мм; способ расположения труб в трубной решетке – по вершинам треугольника (30°). Результаты проектного расчета холодильника-конденсатора ХК-1 позволили установить его основные характеристики: коэффициент теплопередачи – 143 Вт/(м²·К); тепловая нагрузка – 116,2 кВт; площадь теплообменной поверхности – 12,76 м²; среднелогарифмическая разность температур – 35,6 °С. По межтрубному пространству (оборотная вода) гидравлическое сопротивление составило 4,81 кПа, максимальная скорость потока – 0,14 м/с; по трубному пространству (пары / конденсат паров с верха колонны К-1) гидравлическое сопротивление составило 0,07 кПа, максимальная скорость потока – 1,9 м/с.

Расчетный объем емкости орошения Е-1 определен по величине расхода дистиллята в резервуар Р-2 и орошения в колонну К-1 от насосов Н-2/А,Б (суммарно – 0,81 м³/ч) с учетом коэффициента заполнения, равного 0,7, и составил 0,4 м³. Расчетный объем резервуара Р-2 определен по величине расхода дистиллята от насосов Н-2/А,Б (0,15 м³/ч) с учетом коэффициента заполнения, равного 0,8, и составил 200 м³. Расчетный объем резервуара Р-3 определен по величине расхода фракции тяжелых дисульфидов от насосов Н-3/А,Б после водяного холодильника Т-2 (0,41 м³/ч) с учетом коэффициента заполнения, равного 0,8, и составил 400 м³.

Также дополнительно выполнен анализ возможности применения двухколонной схемы выделения ДМДС из дисульфидного масла, в рамках которой в первой колонне (К-1) боковым погоном отбирается фракция ДМДС с чистотой порядка 95,0% масс. и далее поступает на питание второй колонны (К-2), в качестве верхнего продукта которой отбирается ДМДС марки А с содержанием 99,5% масс. основного веще-

ства. По результатам моделирования установлена технико-экономическая нецелесообразность применения двухколонной схемы выделения ДМДС из дисульфидного масла заданного состава, получаемого на белорусском НПЗ, ввиду малого расчетного расхода бокового погона ДМДС из колонны К-1, что в свою очередь влечет ряд проблем в части подбора оборудования, способного работать в оптимальном режиме при расчетной производительности.

Заключение. Моделирование химико-технологического процесса извлечения диметилдисульфида из побочных продуктов вторичных процессов переработки нефтяного сырья в условиях белорусского НПЗ с расширением производства позволило подобрать требуемое технологическое оборудование и определить его оптимальные параметры, а именно: одноклонный вариант ректификации дисульфидного масла с 4-мя слоями нерегулярной насадки типа «кольца Палля» типоразмера 1” (25,0 мм) с обеспечением требуемого качества получаемого диметилдисульфида для выпуска товарного продукта марки А с высокой степенью чистоты 99,5% масс.; теплообменные аппараты Т-1, Т-2, Т-3, ХК-1, которые справляются с расчетной нагрузкой в рамках рассматриваемого режима работы блока, а также объемы аппаратов Е-1, Р-2, Р-3. Глубина извлечения ДМДС из дисульфидного масла составит 99,72% масс. при проектной производительности блока порядка 100 т/год по целевому продукту – диметилдисульфиду марки А, что может на 50% обеспечить требуемый годовой объем потребления в Республике Беларусь и частично решить проблему импортозамещения.

Таким образом, производство на белорусском НПЗ диметилдисульфида с использованием сырья некалорифицированного применения, благодаря достаточной сырьевой базе, позволит расширить ассортимент белорусских химических реагентов, получить востребованную импортозамещающую продукцию и достичь экономического эффекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бойко В.А. Технология выделения дисульфидного масла из щелочных эмульсий нефтегазоперерабатывающих заводов // *Фундаментальные и прикладные проблемы получения новых материалов: исследования, инновации и технологии: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. / Астрахань (23–25 апр. 2025 г.). – Астрахань: Астрахан. гос. ун-т им. В.Н. Татищева, 2025. – С. 193–195. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=88947210>.*
2. Бойко В.А. Производство дисульфидного масла из меркаптанов СУГ // *Нефть и газ – 2025: тезисы докладов 79-й Междунар. молодеж. науч. конф. / Москва (21–25 апр. 2025 г.). – М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа (нац. исслед. ун-т) им. И.М. Губкина, 2025. – С. 630–631. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=82979300>.*
3. Братищев А.В. Очистка нефтепродуктов от сернистых соединений // *Нефтепереработка и нефтехимия. – 2018. – № 5. – С. 34–38.*
4. Белорусские химические реагенты из отходов нефтепереработки / В.А. Глебоко, Ю.А. Булавка, и др. // *Переработка углеводородного сырья: проблемы и инновации – 2022: материалы Междунар. науч.-практ. конф. / Астрахань (10 нояб. 2022 г.). – Астрахань: Астрахан. гос. техн. ун-т, 2022. – С. 25–27. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=50101576>.*
5. Глебоко В.А., Булавка Ю.А., Стальмах Д.В. Химический реагент из отходов нефтепереработки // *Новые горизонты – 2022: сб. материалов IX Белорус.-Китай. молодеж. инновац. Форума / Минск (10–11 нояб. 2022 г.) / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: БНТУ, 2022. – Т. 1. – С. 27–28.*
6. Повышение качества сжиженных углеводородных газов и выделение ценных серосодержащих соединений на Оренбургском газоперерабатывающем комплексе / Ю.В. Лебедев, Д.В. Новиков, Д.С. Алексеев и др. // *Газовая промышленность. – 2025. – № S3(886). – С. 94–99.*
7. Сафронов К.К. Повышение эффективности переработки газового сырья (на примере процесса очистки пропан-бутановой фракции от сернистых соединений) // *Нефтепереработка и нефтехимия. – 2008. – № 10. – С. 12–14.*
8. Машкина А.В., Хайрулина Л.Н. Каталитическое превращение нефтяных диалкилдисульфидов в диалкилсульфиды // *Нефтехимия. – 2018. – Т. 58, № 4. – С. 399–404.*
9. Сернистые соединения нефти – сырье для нефтехимии / Н.Г. Бажирова, А.М. Мазгаров, А.Ф. Вильданов и др. // *Технологии нефти и газа. – 2025. – № 2(157). – С. 3–9. DOI: 10.32935/1815-2600-2025-157-2-3-9*
10. Шарипов А.Х. Меркаптаны из газоконденсатов и нефтей // *Химия и технология топлив и масел. – 2002. – Вып. 4. – С. 50.*
11. Шарипов А.Х. Получение сероорганических соединений из природного углеводородного сырья (обзор) // *Нефтехимия. – 2004. – Т. 44, № 1. – С. 3.*
12. Исследование влияния узких фракций дисульфидного масла на степень растворения асфальтосмолопарафиновых отложений на теплообменном оборудовании Оренбургского газоперерабатывающего завода / К.П. Узун, Е.А. Чернышева, Т.А. Курякова и др. // *Бутлеровские сообщения. – 2019. – Т. 58, № 6. – С. 130–137.*
13. Физико-химические характеристики субститутов дисульфидного масла углеводородного сырья / К.И. Дюсенгалиев, А.Т. Сагинаев, Д.К. Кулбатыров и др. // *Нефтегазовое дело. – 2016. – № 5. – С. 125–139. – URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/issues/5_2016/ogbus_5_2016_p125-139_DysangalievKI_ru.pdf*
14. Рахимов Т.Х., Абдульминев К.Г., Мнушкин И.А. Получение товарных сернистых соединений // *Нефтегазовое дело. – 2015. – № 4. – С. 186–198. – URL: https://ogbus.ru/files/ogbus/issues/4_2015/ogbus_4_2015_p186-198_RakhimovTH_ru.pdf*
15. Исследование сырья для получения товарных сернистых соединений / Г.Н. Латыпова, Ю.Ф. Ситдикова, Т.Х. Рахимов и др. // *Нефтегазопереработка – 2016: междунар. науч.-практ. конф. / Уфа (???) – Уфа: ГУП «ИНХП РБ», 2016. – С. 32–33.*

16. Рахимов Т.Х., Абдильминев К.Г., Набиева А.Р. Варианты извлечения сернистых соединений из углеводородного сырья // Башкирский химический журнал. – 2020. – Т. 27, № 2. – С. 55–58.

Поступила 03.04.2026

**MODELING OF THE CHEMICAL-TECHNOLOGICAL PROCESS
OF EXTRACTION OF DIMETHYL DISULPHIDE FROM BY-PRODUCTS
OF SECONDARY PROCESSES OF OIL REFINING OF BELARUSIAN OIL REFINERY**

V. IVANOV, Y. BULAUKA, P. PLISKIN
(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk)

The article presents the results of modeling a chemical-engineering process for extracting a valuable sulfur-containing compound from a by-product of a liquefied petroleum gas purification unit for removing mercaptans via oxidation in the presence of catalysts – disulfide oil – for a Belarusian oil refinery. The process yields dimethyl disulfide, a widely used reagent in oil refining and petrochemistry, as the target product. The required process equipment has been selected and its optimal parameters have been determined to produce a commercial grade A product with a high purity of 99.5% by weight, with a dimethyl disulfide extraction rate from disulfide oil of 99.72% by weight and a target product throughput of approximately 100 tons per year, which will meet the required annual consumption volume in the Republic of Belarus by 50% and half the import substitution problem. Dimethyl disulfide production at a Belarusian oil refinery using unqualified raw materials will expand the range of Belarusian chemical reagents and achieve economic benefits.

Keywords: *chemical engineering process, disulfide oil, dimethyl disulfide, modeling, oil refining, petrochemistry, import substitution.*

УДК 614.84:331.45

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-84-87

**ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНИКА ЛИКВИДАЦИИ ПОЖАРОВ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ
В ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРАХ****д-р техн. наук, проф. С.Г. ЕХИЛЕВСКИЙ, В.К. ЕМЕЛЬЯНОВ**
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Проведен обзор технологических приемов подачи воздушно-механической пены при подслоном тушении пожаров в вертикальных стальных резервуарах. Определено, что подслоный способ пожаротушения является более эффективным, быстрым, надежным и безопасным по сравнению с остальными способами водопенного тушения возгораний нефти и нефтепродуктов в вертикальных стальных резервуарах. Данный способ надежно защищает от повторного воспламенения горючего, покрытого пленкой, и обеспечивает быстрое растекание пены по горячей поверхности за счет конвективных потоков, перемешивающих поверхностный слой. Выполнен анализ возможности использования существующих технологических коммуникаций вертикальных стальных резервуаров (трубопроводов для слива-налива, линий размывки донных отложений) для реализации подслоного способа пожаротушения. Предложены пути оптимизации технологических параметров подслоного пожаротушения при вводе пены через технологические коммуникации резервуаров.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, воздушно-механическая пена, пожар, резервуар вертикальный стальной, технологический трубопровод, устройство оперативной врезки, генератор пены.

Введение. Одним из приоритетных направлений по предупреждению масштабных утечек нефти и нефтепродуктов является противопожарная защита объектов их хранения. Возникновение пожара в одном из резервуаров, несвоевременная его локализация и ликвидация могут привести к нарушению целостности резервуара, утечке нефти или нефтепродукта, быстрому распространению пожара по всему резервуарному парку, разрушению других резервуаров и еще более масштабному разливу нефти и нефтепродуктов [1].

В установках автоматического пожаротушения, как правило, применяется пена средней кратности с верхним способом подачи. Практический опыт показывает, что подобная технология тушения не является эффективной и надежной. В случае взрыва, обычно предшествующего загоранию, происходит разрушение стационарной системы тушения, расположенной в верхнем поясе резервуара. Поэтому большинство пожаров в резервуарах приходится тушить с помощью передвижной пожарной аварийно-спасательной техники. При этом генераторы огнетушащей пены подаются к верхнему поясу резервуара с помощью автомобильных подъемников. Но большинство огнетушащей пены, поданной таким способом, не попадает в резервуар, поскольку уносится потоками окружающего воздуха и выделяющегося при горении дыма [2].

В связи с этим для тушения резервуаров с нефтью и нефтепродуктами наиболее эффективен подслоный способ пожаротушения, при котором пена подается в слой горючей жидкости [3]. Вместе с тем реализация подслоного способа в Беларуси до 2011 г. была сопряжена с необходимостью капитального ремонта резервуара, что требовало прекращения эксплуатации всего резервуарного парка на время капитального ремонта. С целью обеспечения возможности реализации подслоного способа пожаротушения через существующие технологические коммуникации резервуаров (трубопроводы для слива-налива, линии размывки донных отложений) в МЧС Беларуси были разработаны технология и техника оперативной врезки [4; 5].

Для внедрения указанных технологии и техники в практику пожаротушения необходима разработка методологии, позволяющей определить номенклатуру и количество единиц оборудования, а также требуемый объем огнетушащего вещества (пенообразователя), что определило актуальность и *цель настоящего исследования.*

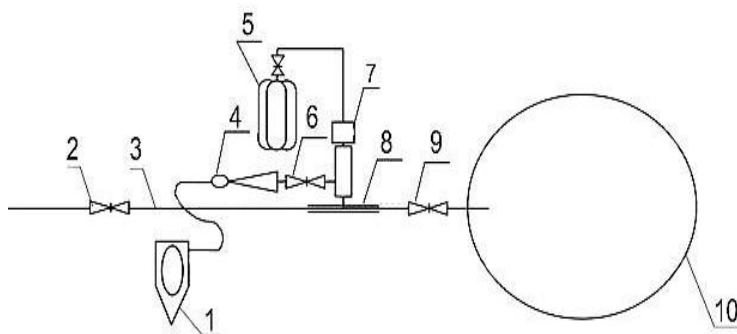
Результаты и их обсуждение. Подслоный способ пожаротушения является более эффективным, быстрым, надежным и безопасным по сравнению с остальными способами водопенного тушения [1; 2]. Подслоный способ внедрен на крупных хранилищах Мозырского НПЗ и Департамента по материальным резервам МЧС. Основное достоинство подслоного способа заключается в надежной защите от повторного воспламенения горючего, покрытого пленкой, и более быстром растекании пены по горячей поверхности, т.к. конвективные потоки перемешивают поверхностный слой.

Согласно результатам исследований [6], подача пены подслоным способом возможна не только через пенопроводы системы пожаротушения, но и через технологические коммуникации (нефтепродуктопроводы, линии размывки донных отложений), расположенные в нижней части резервуара. При этом практически полностью исключается возможность повреждения пеногенераторов и коммуникаций системы тушения взрывами и тепловыми потоками. Пена низкой кратности, поступающая из пеногенераторов, находящихся за обвалованием, выталкивается из трубопроводов горючее и поступает в резервуар, что решает проблему соблюдения требований охраны труда в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям¹.

¹ Об утверждении Правил по охране труда в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь от 23 окт. 2003 г. № 34 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь – URL: [https://pravo.by/pdf/2003-130/2003-130\(027-077\).pdf](https://pravo.by/pdf/2003-130/2003-130(027-077).pdf) (дата обращения: 20.03.2026).

На сегодня большинство резервуаров не оснащено стационарными системами подслоного пожаротушения. Подслоный способ пожаротушения резервуаров может быть осуществлен с помощью передвижной пожарной аварийно-спасательной техники. В этом случае технологические трубопроводы резервуаров должны быть укомплектованы специальными патрубками для подключения высоконапорных пеногенераторов. Между пеногенератором и продуктопроводом обязательно устанавливается задвижка для предотвращения утечки нефтепродукта после прекращения подачи пены через высоконапорный пеногенератор.

На рисунке 1 приведена принципиальная схема реализации подслоного способа пожаротушения совместно с технологией оперативной врезки.



1 – пожарный аварийно-спасательный автомобиль; 2, 6, 9 – шаровый кран (задвижка);
3 – технологический трубопровод; 4 – высоконапорный генератор пены;
5 – источник сжатого воздуха; 7 – устройство врезки; 8 – бандаж; 10 – резервуар

Рисунок 1. – Принципиальная схема реализации подслоного способа пожаротушения совместно с технологией оперативной врезки

На рисунке 2 показан общий вид устройства оперативной врезки (вдоль трубопровода), на рисунке 3 – общий вид со стороны сечения трубопровода.

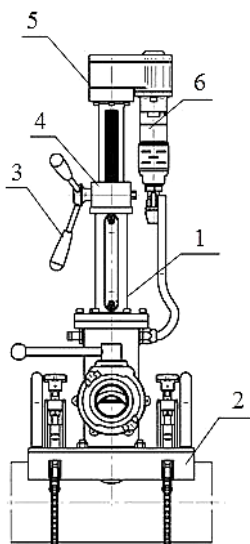


Рисунок 2. – Общий вид устройства оперативной врезки (продольный разрез по трубопроводу)

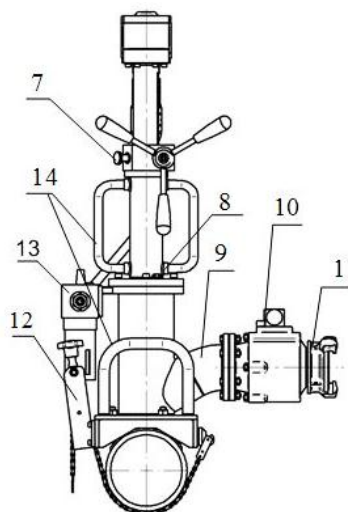


Рисунок 3. – Общий вид устройства оперативной врезки со стороны поперечного сечения трубопровода

Согласно результатам исследований [6], диаметр продуктопровода должен обеспечивать линейную скорость движения пены не более 3 м/с. При несоблюдении данного условия тушение такого резервуара подслоным способом через продуктопровод невозможно: происходит захват горючей жидкости потоком всплывающей пены, в результате чего пена теряет свои огнетушащие свойства. Так, резервуар РВС-1000 на нефтебазе РУП «Белоруснефть-Брестоблнефтепродукт» концерна «Белнефтехим» (пожар 3 мая 2008 г.), оснащенный продуктопроводом диаметром 150 мм, мог быть потушен подслоным способом. Единственной проблемой, препятствовавшей этому, стало отсутствие патрубка для ввода пены в технологический трубопровод.

Как показано в [4], эффективность подслоного тушения максимальна при линейной скорости введения пены в слой горючего в диапазоне 0,5 до 3 м/с. Для получения пены используется водный рабочий раствор фторсинтетического пенообразователя для тушения пожаров типа AFFF. Получение рабочего раствора пенообразователя осуществляется с помощью пеносмесителей или дозирующих устройств непосредственно перед использованием.

При введении пены под слой подтоварной жидкости минимальное время тушения достигается при скорости подачи пены 2 м/с [5].

В соответствии с [6], расчетное количество пеногенераторов, необходимых для тушения резервуара, рассчитывается исходя из нормативной интенсивности подачи раствора пенообразователя, площади тушения и расхода раствора пенообразователя через пеногенератор. Полученный результат округляется до целого числа в большую сторону.

Требуемое количество раствора пенообразователя для тушения горючей жидкости в резервуаре определяется, основываясь на расчетном (нормативном) времени тушения, а расчетный запас пенообразователя – на требованиях трехкратного запаса согласно постановлению МЧС².

Работоспособность системы подслоного тушения определяется давлением пены на выходе из высоконапорного пеногенератора исходя из условия, что давление пены на выходе из пеногенератора не ниже суммы гидростатического давления горючей жидкости, местных потерь давления в трубопроводе, линейных потерь давления в трубопроводе и давления, необходимого для обеспечения подачи пены в слой горючей жидкости. При этом гидростатическое давление горючей жидкости определяется как произведение плотности горючей жидкости на ускорение свободного падения и максимальную высоту налива горючей жидкости в резервуаре.

Согласно [7], подача пены подслоным способом осуществляется как стационарными автоматическими системами пожаротушения, так и от передвижной пожарной техники с помощью стационарных вводов пены в резервуар, оборудованных высоконапорными пеногенераторами (далее – ВПГ). Для подключения ВПГ к технологическим коммуникациям резервуаров, не оснащенных стационарными системами пожаротушения и вводами пены, применяется технология оперативной врезки³.

При совместном использовании подслоного способа пожаротушения с технологией оперативной врезки подключение оборудования для тушения производится в первые минуты после возникновения возгорания, пена через пеногенератор и устройство оперативной врезки подается в технологический трубопровод, а затем в слой горючей жидкости.

Для установления оптимальных значений технологических параметров тушения, обеспечивающих заданные временные показатели (критерии) тушения, авторами работы [8] проведены экспериментальные исследования процесса движения огнетушащей пены на всех этапах и разработана математическая модель, устанавливающая взаимосвязь характеристик процесса подслоного тушения, реологических свойств нефтепродукта, времени прохождения пены по технологическому трубопроводу до выхода в резервуар.

Расчет времени прохождения пены выполняется исходя из скорости ее движения, значения расхода раствора пенообразователя [9]. При расчете времени подъема пены представлен алгоритм расчета времени достижения поверхности нефтепродукта первой порцией пены, т.е. момент начала процесса растекания пены по поверхности. Затем процессы подъема пены в резервуаре и растекания по поверхности идут параллельно и одновременно. Время растекания пены по поверхности горения описано выражением, приведенным в трудах А.Ф. Шароварникова [1; 3; 8]. Таким образом, суммируя время движения огнетушащей пены на всех трех этапах – движение по трубопроводу от места врезки до резервуара, подъем в резервуаре и растекание по поверхности нефтепродукта, получают полное время тушения, которое является основным критерием эффективности тушения.

Заключение. С целью внедрения подслоного способа пожаротушения резервуаров, не оснащенных автоматическими системами подслоного тушения и стационарными патрубками для ввода пены, совместно с технологией оперативной врезки актуальной представляется разработка методологии определения номенклатуры и количества единиц техники, реализующей технологию оперативной врезки. Для этой цели целесообразно разработать алгоритмы оптимизации подачи воздушно-механической пены. Выполнение указанной задачи будет способствовать повышению уровня пожарной безопасности, снижению ущерба, травматизма и гибели персонала на объектах хранения нефти и нефтепродуктов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов подачей пены в слой горючего. – М.: Пожжника, 1996. – С. 27–36.

² Об утверждении Правил по охране труда в органах и подразделениях по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь от 23 окт. 2003 г. № 34 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь – URL: [https://pravo.by/pdf/2003-130/2003-130\(027-077\).pdf](https://pravo.by/pdf/2003-130/2003-130(027-077).pdf) (дата обращения: 20.03.2026).

³ Разработать тактику тушения подслоным способом нефти и нефтепродуктов в резервуарах, не оборудованных стационарной системой пожаротушения: отчет о НИР (заключ.) / НИИ ПБиЧС МЧС Беларуси; рук. О.В. Черневич. – Минск, 2010. – 53 с. – № ГР 2009141.

2. Сучков В.П., Молчанов В.П. Варианты развития пожара в хранилищах нефтепродуктов // Пожарное дело. – 1994. – № 11. – С. 40–44.
3. Шароварников А.Ф., Молчанов В.П. Подслоное тушение // Пожарное дело. – 1995. – № 1. – С. 40–41.
4. Способ оперативной врезки и оборудование для подслоного тушения пожаров нефти и нефтепродуктов в резервуарах, не оснащенных стационарными системами пожаротушения и пенопроводами / В.К. Емельянов, С.М. Малашенко, О.В. Черневич и др. // Проблемы техносферной безопасности – 2012: материалы междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых и специалистов / Москва (10 апр. 2012 г.) / Академия ГПС МЧС России. – М., 2012. – С. 83–85.
5. Устройство врезки в продуктопровод для подачи воздушно-механической огнетушащей пены в горящий резервуар / С.М. Малашенко, О.О. Смиловенко, В.К. Емельянов и др. // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2(32). – С. 148–156.
6. Экспериментальное определение норм технологических режимов и технологических приемов подслоного тушения пожаров в резервуарах для хранения нефти и нефтепродуктов / С.М. Малашенко, О.Д. Навроцкий, О.О. Смиловенко и др. // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2013. – № 1(33). – С. 78–85.
7. Тербнев В.В. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Пожкнига, 2004. – С. 34–37.
8. Корольченко Д.А., Шароварников А.Ф. Факторы, снижающие огнетушащую эффективность послойной системы при тушении пламени нефтепродуктов // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – Т. 25, № 4. – С. 56–67.
9. Минкин Д.Ю., Малашенко Д.Ю., Смиловенко О.О. Повышение эффективности подслоного тушения резервуаров с нефтепродуктами // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2016. – № 1(37). – С. 47–54.

Поступила 13.04.2026

TECHNOLOGY AND TECHNIQUES OF OIL AND OIL PRODUCTS FIRE ELIMINATION IN VERTICAL STEEL TANKS

S. EKHILEVSKY, V. YEMIALYANAU
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

A review of air-mechanical foam delivery techniques for subsurface fire suppression in vertical steel storage tanks is provided. Subsurface fire suppression is found to be more effective, faster, more reliable, and safer than other water-foam methods for extinguishing oil and petroleum product fires in vertical steel storage tanks. This method reliably prevents the rekindling of film-coated fuel and ensures rapid foam spreading over the burning surface due to convective currents mixing the surface layer. An analysis is made of the feasibility of using existing vertical steel storage tank utilities (filling/unloading pipelines, bottom sediment cleaning lines) for subsurface fire suppression. Optimization of subsurface fire suppression parameters when foam is injected through the storage tank utilities is proposed.

Keywords: *oil, petroleum products, air-mechanical foam, fire, vertical steel storage tank, utility pipeline, rapid tapping device, foam generator.*

УДК 665.775

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-88-91

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ УПАКОВЫВАНИЯ И ТРАНСПОРТА НЕФТЯНОГО БИТУМА

канд. техн. наук, доц. П.В. КОВАЛЕНКО, канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Приведены результаты анализа современных технологий упаковывания и транспорта нефтяного битума, который позволил установить, что в настоящее время наиболее широко распространена доставка продукта в «горячем» виде автомобильным и железнодорожным транспортом с использованием цистерн и битумовозов, которые могут быть модернизированы путем применения современных теплоизоляционных материалов, дооборудованы равномерным прогревом по всему объему с нижним сливом продукта и перемешивающими устройствами. Также перспективна транспортировка битума в упакованном «холодном» виде в кластерейнерах, биг-бэгах, кубовидных контейнерах, картонно-навивных барабанах, металлических бочках, контейнерах с металлической обечайкой, мешках и композитах, изготовленных с использованием полимерных материалов. Несмотря на высокую стоимость упаковки битума для перевозки в «холодном» виде, данный способ приводит к снижению нагрузки на окружающую среду и улучшению эксплуатационных свойств товарного продукта.

Ключевые слова: нефтяной битум, высокозастывающие нефтепродукты, транспорт, упаковывание, кластерейнер, полимерно-битумное вяжущее, полимерно-модифицированный битум.

Введение. В настоящее время производители битумных материалов выпускают около двухсот марок битумов различного назначения, используемых при строительстве дорог, сооружений, зданий, кровли, гидроизоляции фундаментов и санузлов, заливки трещин, при прокладке трубопроводов и др. При этом применяют как остаточные битумы, полученные перегонкой нефти под вакуумом, так и окисленные воздухом на битумных установках при температурах 260–280 °С, а также компаундированные – полученные смешением остаточных и окисленных; и модифицированные различными добавками, чаще всего полимерами, так называемые полимерно-битумных вяжущие и полимерно-модифицированные битумы. Получение потребителями качественных битумных материалов сегодня определяется не только составом исходного сырья и влиянием технологических параметров производственного процесса изготовления товарной продукции на нефтебитумных заводах и НПЗ, но и факторами, влияющими на промежуточных этапах жизненного цикла битума от производства до потребления, таких как упаковка, хранение и транспорт. На рисунке приведены основные этапы жизненного цикла битумного материала от производства до потребления.

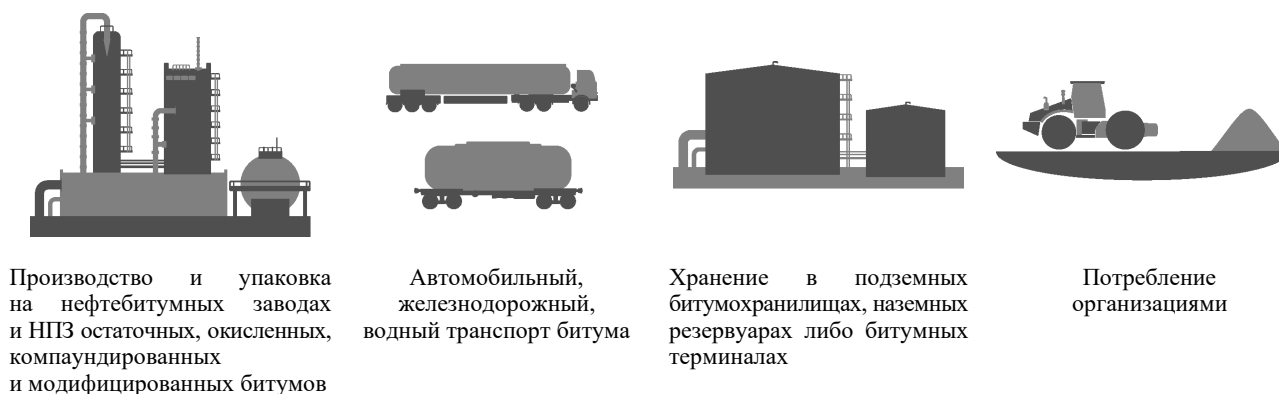


Рисунок. – Основные этапы жизненного цикла битумного материала от производства до потребления

Значительную роль в сохранении исходных эксплуатационных показателей качества товарного продукта играют процессы его транспорта и хранения. В частности, на этапе погрузки в расплавленном состоянии (в «горячем» виде) в цистерны, а также при транспортировке и его выгрузке температура битума может достигать 180 °С и выше, что приводит к интенсификации процессов деструкции и старения, обусловленных потерей легколетучих компонентов, а также процессов окисления кислородом воздуха при неполной герметичности битумовоза. На этапе хранения в подземных битумохранилищах либо наземных резервуарах нагрев жаровыми трубами либо электрическими ТЭНами, отсутствие автоматизированных средств контроля за нагревом зачастую приводит к чрезмерному перегреву и, как следствие, ухудшению эксплуатационных свойств продукта

(снижению пенетрации и растяжимости, повышению вязкости и др.). Отсутствие перемешивающих устройств на этапах хранения и транспорта (в особенности полимерно-битумных композиций, представляющих из себя дисперсные системы неустойчивого состояния) приводит к неоднородности товарного битума и возможности его расслоения [1]. Длительное хранение в подземных хранилищах битума сопровождается риском попадания прямых солнечных лучей и его обводнения дождевыми осадками, проникновением грунтовых вод. Использование нагрева паром при наземном хранении в металлических горизонтальных и вертикальных резервуарах также может привести к его обводнению и необходимости последующего выпаривания. Современные технологии упаковки, транспорта и хранения битума в «холодном» виде лишены большинства ранее описанных недостатков. В связи с этим изучение современных технологий упаковывания и транспорта нефтяного битума является актуальной научной задачей, что и определило *цель настоящего исследования*.

Результаты и их обсуждение. Нефтяные битумы относятся к высокозастывающим нефтепродуктам специального назначения с температурой застывания выше температуры окружающей среды, которые производят и используют в «горячем» расплавленном виде, а транспортируют и хранят как «горячем», так и «холодном». Каждый из способов характеризуется своими преимуществами и недостатками [2–9].

В странах СНГ в «горячем» виде транспортируют большую часть дорожных битумов и до 20% строительных и высокоплавких битумов [10]. В странах дальнего зарубежья до 90% всех высокозастывающих нефтепродуктов специального назначения перевозят в «горячем» виде автомобильным, железнодорожным либо водным транспортом [10–12]. При этом объемы перевозки автомобильным транспортом в 8–9 раз выше, чем железнодорожным [11–12]. Плечо доставки битумных материалов может достигать 2000 км, и перевозка битума на расстояния более 1000 км железнодорожным транспортом выгоднее, чем автомобильным.

Использование железнодорожных цистерн с паровой рубашкой устаревшей конструкции из-за отсутствия тепловой изоляции приводит к быстрому остыванию битума, необходимости повторного многократного длительного энергозатратного прогрева, что усугубляет процессы старения битумных материалов. Неравномерный прогрев приводит к формированию остатка в цистернах, что влечет нарушение сроков их выгрузки и штрафы, а разогрев водяным паром может привести к обводнению продукта, при этом обводненность в некоторых случаях достигает 8% масс.

К методам совершенствования транспорта битума в «горячем» виде относят применение современных теплоизоляционных материалов для железнодорожных цистерн с толщиной слоя не менее 15 см, оборудование железнодорожных цистерн обогревом ТЭНами или диатермальным маслом; теплоизолированных автоцистерн-термосов, что позволяет поддерживать заданную температуру продукта. Равномерный прогрев цистерны по всему объему с нижним сливом и перемешивающими устройствами обеспечивает более полное удаление битума из цистерны без остатка и сохранение его качества на пути следования к потребителю.

К преимуществам транспорта битума в «горячем» виде по сравнению с «холодным» способом в твердом упакованном состоянии относят меньшие затраты у потребителя, связанные с разогревом материала и удалением упакованной тары, а на станции производства отсутствуют операции охлаждения и упаковывания товарного битума. Недостаток данного способа – необходимость использования цистерн с теплоизоляцией, оборудованных средствами обогрева, а также порожний возврат тары [11–12].

Избежать значительных затрат на поддержание битума в расплавленном состоянии можно, если его хранить и транспортировать в упакованном «холодном» виде в кубовидных контейнерах, поликубах, металлических бочках (конусных, навивных и др.), контейнерах типа биг-бэг, универсальных однотоннажных контейнерах из многослойного картона типа клавертейнер, картонно-навивных барабанах, мешках по технологии PolyCube system, контейнерах с металлической обечайкой и т.п. [13–16]. При этом тару выпускают различной вместимости из картона, полимеров либо металла с возможностью нахождения под открытым небом в течение длительного периода. В ГОСТ 1510-2022 «Нефть и нефтепродукты маркировка, упаковка, транспортирование и хранение» закреплена возможность упаковывания твердых нефтепродуктов в мешки (пакеты) бумажные, полимерные (полиэтиленовые), картонно-навивные барабаны с применением полиэтиленовых вкладышей. Допускается упаковывать битумы (в т.ч. полимерно-модифицированные битумы) в разовую, жесткую, штабелируемую, кубическую транспортную тару (упаковку).

При упаковывании битумов с температурой размягчения по методу КиШ не ниже 45 °С допускается использовать мягкие контейнеры типа биг-бэг. Битумы, имеющие температуру размягчения по методу КиШ не ниже 35 °С, допускается упаковывать в кубические контейнеры для битума типа клавертейнер. Битумы с температурой размягчения не ниже 65 °С – в картонные коробки с внутренним вкладышем из антиадгезионной бумаги, бумажные мешки, картонные или металлические барабаны, бочки. Вся тара должна быть химически нейтральной к битумам (в т.ч. полимерно-модифицированным битумам), термостойкой при разогреве битумов до температуры 160 °С, достаточно герметичной для исключения протечек битума и попадания внутрь тары воды и загрязняющих частиц (веществ).

Допускается упаковывать дробленый хрупкий битум в мягкие контейнеры.

Выбор способа упаковки битума для транспортирования в «холодном» виде определяется рядом следующих критериев, а именно: необходимые прочность и жесткость при транспортировке, погрузке и разгрузке, хранении; стойкость к неблагоприятным метеорологическим условиям при открытом складировании груза;

устойчивость к долгосрочному складскому хранению в нескольких ярусах; технологичность расплавления и налива без протечек, возможность автоматизированного налива.

В частности, использование крафт-бумажной тары для упаковывания битумов обеспечивает высокую производительность при простой технологии налива, одновременно может заливаться до 2 т битума в 6–8 мешков по 200–250 кг [12–14]. Однако данный вид упаковки характеризуется и рядом недостатков: крафт-бумажная тара при наливке может разрываться с разливом продукта и загрязнением рабочей зоны; при высоких температурах окружающей среды в летний период болванки с битумом, упакованные в бумагу, слипаются в монолит, который для выгрузки дробят вручную; бумажная упаковка является одной из причин пожаров при перевозке битума по железной дороге; процесс удаления упаковки сопровождается образованием не утилизируемых отходов бумаги с прилипшим к ней частицам битума (теряется около 8 кг бумаги на 1 т битума), что приводит к потерям продукта и загрязнению окружающей среды твердыми отходами; потери битума при использовании крафт-бумажной тары доходят до 15% [2–10].

Металлические бочки используют для транспортирования битума на экспорт либо в отдаленные районы Севера. Вместе с тем утилизация этой тары или ее возврат практически невозможны, что приводит к большим потерям металла. Цена такой тары превышает стоимость перевозимого продукта. Так, для перевозки 1 т битума требуется 6 бочек по 200 л, при расходе металла около 200 кг, при этом в таре после опорожнения остается около 4...6% битума [11–12].

Перспективна технология упаковывания способом формирования битумной «сумки» из полиэтиленовых мешков с получением блоков или плит. Определенный объем битума инкапсулируется в битумный мешок, состоящий из битумного соединения: около 10–30% от массы битума и около 5–25% от массы полимера; у потребителя битумный состав расплавляется и полностью смешивается с расплавленным битумом без остатков, но при этом улучшаются эксплуатационные свойства товарной продукции [15]. Достоинством использования полиэтиленовой пленки в качестве упаковочного материала является возможность использования тары вместе с битумом, что снижает нагрузку на окружающую среду; уменьшает потери продукта при подготовке к использованию; повышаются показатели качества товарного битума; снижается объем ручного труда для удаления упаковки продукта; снижается риск слипания и возгорания тары и продукта [2–10].

Еще один из перспективных вариантов упаковывания строительного битума в полиэтиленовый рукав, который раздувается сжатым воздухом, позволит упаковывать битум без его предварительного охлаждения; сократить выбросы вредных веществ за счет использования герметичной тары; уменьшить затраты электроэнергии за счет использования двустадийной технологии упаковывания; сократить время погрузки и разгрузки; исключить операции утилизации тары и дробления битума; снизить загрязнение окружающей среды твердыми отходами; использовать вторичный полиэтилен в качестве тары [10].

Способ транспортировки в упакованном «холодном» виде не относится к категории «опасного груза», требующего разрешения на перевозку и специальной цистерны для темных нефтепродуктов, доставляемых при повышенной температуре (выше 100 °С). Транспортировка в упакованном «холодном» виде допускает перевозку традиционными судами, грузовиками, морскими контейнерами, не требующими обогрева груза. Однако возникают дополнительные расходы при производстве битумных материалов на их фасовку и упаковывание, складирование и хранение. При этом стоимость упаковки битума в некоторых случаях достигает 13–15% от стоимости товарного продукта, что сдерживает широкое распространение холодных поставок и их узкое использование при транспорте дорогих полимерно-модифицированных битумов и специальных строительных материалов для ответственных объектов строительства. Кроме того, способ транспортировки в упакованном «холодном» виде требует наличия у потребителей товарного битума площадок для хранения и размещения, энергозатратной установки разогрева и в некоторых случаях емкостного парка и станцией налива, что экономически оправданно при транспорте битума в отдаленные труднодоступные районы, где доставка в «горячем» виде затруднена.

Заключение. Анализ современных технологий упаковывания и транспорта нефтяного битума показал, что в настоящее время наиболее широко распространена доставка продукта в «горячем» виде автомобильным и железнодорожным транспортом с использованием цистерн и битумовозов, которые могут быть модернизированы путем применения современных теплоизоляционных материалов, дооборудованы равномерным прогревом по всему объему с нижним сливом продукта и перемешивающими устройствами. Также перспективна транспортировка битума в упакованном «холодном» виде в кластерейнерах, биг-бэгах, кубовидных контейнерах, картонно-навивных барабанах, металлических бочках, контейнерах с металлической обечайкой, мешках и композитах, изготовленных с использованием полимерных материалов. Несмотря на высокую стоимость упаковки битума для перевозки в «холодном» виде, данный способ приводит к снижению нагрузки на окружающую среду и улучшению эксплуатационных свойств товарного продукта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газизов Р. Э., Солодова Н. Л., Вагапов Б. Р. Трубопроводный транспорт тяжелой нефти и битумов // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 10. – С. 17–21.

2. Шульман З.П., Коваленко П.В. Упаковывание высокозастывающих нефтепродуктов с использованием полиэтиленовой пленки и методы их транспортирования // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2007. – № 8. – С. 138–144.
3. Коваленко П.В. Технология упаковывания битума и других специальных нефтепродуктов // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2012. – № 4(269). – С. 86–90.
4. Теряева З.С., Коваленко П.В., Липский В.К. Экологические аспекты технологии упаковывания битумов // Химия и технология топлив и масел. – 2003. – № 5(519). – С. 51–53.
5. Коваленко П.В. Экологические проблемы упаковывания и транспортирования твердых битумов // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. тез. VIII междунар. науч.-техн. конф. / Новополоцк (25–28 нояб. 2014 г.). – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2014. – С. 32–34.
6. Коваленко П.В., Липский В.К., Теряева З.С. Расчет процесса охлаждения битумов при упаковывании в полиэтиленовую пленку // Безопасность и надежность трубопроводного транспорта: сб. науч. тр. / Новополоцк (20 окт. 2000 г.). – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 2000. – С. 157–169.
7. Коваленко П.В. Исследование реологических свойств битумных композиций // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. Строительство. – 2007. – № 6. – С. 101–106.
8. Коваленко П.В. Моделирование процесса охлаждения битума при упаковывании в полиэтиленовую пленку // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С, Фундаментальные науки. – 2006. – № 10. – С. 170–173.
9. Коваленко П.В. Исследование свойств битумно-полимерных композиций // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2008. – № 2. – С. 128–133.
10. Коваленко П.В. Процессы упаковывания высокозастывающих нефтепродуктов в полиэтиленовую пленку и методы их транспортирования // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2004. – № 12. – С. 162–170.
11. Зубков П.О. Классификация и способы транспортировки битумов // EurasiaScience: сб. ст. XXI междунар. науч.-практ. конф. / Москва (15 мая 2019 г.). – М.: Актуальность.РФ – С. 64–66.
12. Зубков П.О. Классификация битумов способы транспортировки битумов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сб. науч. ст. по итогам 6-й междунар. науч. конф. В 2 ч. / Казань (31 июля 2019 г.). – М.: КОНВЕРТ, 2019. – Ч. 1. – С. 135–138. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=40868157&ysclid=mo46g7j41p808824775>.
13. Аскаров Р.М., Небратенко Д.Ю. Анализ применяемых вариантов затаривания дорожного битума // Вестник КРСУ. – 2022. – Т. 22, № 12. – С. 40–48.
14. Новое в технологии производства битумных материалов / А.А. Гуреев, В.А. Сомов, А.И. Луговской и др. // Химия и технология топлив и масел. – 2000. – № 2. – С. 49–51.
15. Коновалов А.А., Гуреев А.А., Олтырев А.Г. О создании комплексного производства битумных материалов // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2002. – № 3. – С. 18–24.
16. Recycling of low-value packaging films in bitumen blends: A grey-based multi criteria decision making approach considering a set of laboratory performance and environmental impact indicators / S. Nizamuddin, M. Jamal, F. Giustozzi et al. // Science of The Total Environment. – 2021. – Vol. 778. – 146187. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146187

Поступила 06.04.2026

MODERN TECHNOLOGIES FOR PACKAGING AND TRANSPORTING OIL BITUMEN

P. KOVALENKO, Y. BULAUKA
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article presents the results of an analysis of modern technologies for packaging and transporting petroleum bitumen. It has been established that the most common method of shipping the product "hot" by road and rail is tank cars and bitumen tankers. These can be modernized with modern thermal insulation materials, equipped with uniform heating throughout the entire volume, a bottom discharge, and mixing devices. Also promising is the transportation of bitumen in "cold" packaging in clovertainers, big bags, cube-shaped containers, cardboard-wound drums, metal barrels, metal-shell containers, bags, and composites made using polymer materials. Despite the high cost of packaging bitumen for "cold" transportation, this method reduces the environmental impact and improves the performance properties of the finished product.

Keywords: *petroleum bitumen, high-freezing petroleum products, transportation, packaging, clovertainer, polymer-bitumen binder, polymer-modified bitumen.*

УДК 665.775

DOI 10.52928/2070-1616-2026-54-2-92-95

МОДИФИЦИРОВАНИЕ НЕФТЯНОГО БИТУМА ИЗДЕЛИЯМИ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА

канд. техн. наук, доц. Ю.А. БУЛАВКА,
канд. техн. наук, доц. П.В. КОВАЛЕНКО, М.А. ЧУДОВ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Приведены результаты исследований по вовлечению полиолефильных полимеров, а именно: пленки полиэтиленовой низкой плотности высокого давления, полиэтиленового воска ПВ-200, низкомолекулярного полиэтилена и вспененного полиэтилена, в производство битумных материалов. Установлено, что использование таких полиолефиновых полимеров, как вспененный полиэтилен и полиэтиленовый воск, растворенных в отработанном индустриальном масле, позволяет повысить теплостойкость и морозостойчивость битума с расширением интервала его пластичности. Проведенные исследования подтвердили потенциальную возможность вторичного использования изделий из полиэтилена в производстве битумных материалов для неотвеченных объектов строительства.

Ключевые слова: нефтяной битум, полимерно-модифицированный битум, полиэтилен высокого давления, полиэтиленовый воск, низкомолекулярный полиэтилен, вспененный полиэтилен.

Введение. Важными задачами, стоящими сегодня перед нефтеперерабатывающей промышленностью, являются повышение качества выпускаемых продуктов, в т.ч. битумов, и внедрение безотходных технологий. Целесообразным способом решения проблемы повышения эксплуатационных свойств битумных материалов выступают создание полимерно-модифицированных композиций и производство вяжущих четвертого поколения. Битумы, модифицированные полимерами, обеспечивают высокий уровень эксплуатационных показателей качества, таких как: теплостойкость, трещиностойкость, морозостойчивость, сдвигоустойчивость, долговременная прочность и сопротивление низкотемпературному растрескиванию. Однако введение небольшого процента добавки в битум приводит к увеличению его стоимости в 3–4 раза, что обусловлено высокой стоимостью пластификаторов и полимеров (термоэластопластов типа стирол-бутадиен-стирольных каучуков и т.п.), что обуславливает необходимость поиска альтернативных модификаторов на основе вторичных и отработанных продуктов [1–12].

Цель исследования заключается в разработке полимерно-модифицированных композиций на основе дорожного битума и полимера-модификатора, изготовленного на основе изделий из полиэтилена, растворенных в отработанном индустриальном масле, для оценки потенциальной возможности вторичного использования полимеров совместно с отработанными маслами в производстве битумных материалов.

Методы исследований. Исследование включало четыре последовательных этапа. На первом этапе подобраны исходные сырьевые компоненты и изучены их свойства, а именно: дорожного битума марки БНД 50/70 производства ОАО «Нафтна» по СТБ EN 12591; выполнены высушивание и измельчение полимеров полиолефильных полимеров; подбор пластификатора. Объектами исследования являлись изделия из полиэтилена: пленка из полиэтилена низкой плотности высокого давления (пленка ПВД); полиэтиленовый воск ПВ-200 (ПЭ воск); низкомолекулярный полиэтилен с температурой каплепадения 75 °С (НМПЭ) и вспененный полиэтилен (ВПЭ). В качестве пластификатора применили отработанное индустриальное масло марки И-20А из узлов механизмов металлорежущего станка с характеристиками: вязкость кинематическая при 40 °С 42,35 мм²/с; плотность при 20 °С 887 кг/м³; температура вспышки в открытом тигле 223 °С; температура застывания минус 16 °С. На втором этапе выполнено приготовление комбинированных добавок на основе полиолефильных полимеров и пластификатора путем смешения с последующей термической обработкой при температуре 130–140 °С при перемешивании мешалкой в течение 3 ч. На третьем этапе выполнено компаундирование дорожного битума комбинированными добавками при температуре 130–140 °С при перемешивании в течение 3 ч. Получили образцы с содержанием исходного битума 86,5% масс., отработанного индустриального масла – 10% масс. и полимера – 3,5% масс. На четвертом этапе выполнено тестирование основных эксплуатационных показателей качества модифицированных битумов. Анализ модифицированных битумов осуществляли по таким показателям качества, как глубина проникания иглы, температуры размягчения и хрупкости, растяжимость и упругое восстановление, растворимость в толуоле, температура вспышки в открытом тигле. Были рассчитаны интервал пластичности и индекс пенетрации, определена стойкость к затвердеванию и адгезия по песчано-гравийной смеси.

Результаты и их обсуждение. В результате компаундирования однородный конечный продукт получен для всех композиций, кроме образцов с пленкой ПВД. Свойства полученных битумных композиций, модифицированных полиолефильными полимерами, в сравнении с товарным битумом и требованиями ТНПА приведены в таблице.

Таблица. – Свойства полученных битумных композиций модифицированных полиолефильными полимерами в сравнении с товарным битумом и требованиями ТНПА

Основные факторы	Норма для марки РМВ 90/150-45	Значение для марки БНД 50/70 производства ОАО «Нафтан»		Композиции в массовом соотношении в 3,5%:10%:86,5% полимера: пластификатора: битума			
		по СТБ EN 12591	фактическое значение	НМПЭ	пленка ПВД	ВПЭ	ПЭ воск
Глубина проникания иглы, 0,1 мм при 25 °С по ГОСТ EN 1426-2017 (EN 1426:2015)	90–150	50–70	49	177	158	152	120
Температура размягчения по методу «Кольцо и шар», °С по ГОСТ EN 1426-2017 (EN 1426:2015)	≥ 45	46–54	47	35	42	42	48
Растяжимость, см, при 25 °С по ГОСТ 11505-75	–	≥ 60*	84	93	25	68	44
Упругое восстановление при 25°С, % по СТБ EN 13398-2011	≥ 50	–	92	86	95	94	84
Температура хрупкости по Фраасу, °С по ГОСТ EN 12593-2017 (EN 12593:2015)	≤ -18	≤ -8	-7	-18,5	-8	-17,5	-15
Интервал пластичности по СТБ EN 14023-2011	–	–	54	53,5	50	59,5	63
Индекс пенетрации по СТБ EN 12591-2010 Приложение А (EN 12591-2009)	-1,5–+0,7	-1,5–+0,7	1,06	0,65	0,07	0,11	-0,27
Температура вспышки в открытом тигле, °С по СТБ ISO 2592-2010 (ISO 2592:2000)	≥ 235	≥ 230	> 235	> 235	> 235	> 235	> 235
Растворимость в толуоле, % по ГОСТ EN 12592-2017 (EN 12592:2014)	–	≥ 99,0	99,96	99,89	98,52	99,10	99,70
Стойкость к затвердеванию при 163 °С по ГОСТ EN 12607-1-2017 (EN 12607-1:2014):							
– остаточная пенетрация, %	≥ 50	≥ 50	13	62	56	54	59
– увеличение температуры размягчения, °С	≤ 10	≤ 9	2	4	13	9,5	7
– изменение массы – (абсолютное значение), %	≤ 0,5	≤ 0,5	0,01	0,03	0,08	0,01	0,08

*по ГОСТ 33133-2014.

Анализ изменения температуры размягчения показал, что компаундирование исходного битума с 3,5% масс. добавками полиолефильных полимеров и 10% масс. отработанного индустриального масла приводит к снижению этого показателя на 5 °С для пленки, вспененного полиэтилена и на 12 °С для низкомолекулярного полиэтилена. Падение температуры размягчения битумных смесей связано с увеличением соотношения масла/асфальтены, обусловленного вовлечением пластификатора в битум. Растет температура размягчения при модифицировании исходного битума полиэтиленовым воском, растворенном в масле. При этом полученный образец полимерно-битумной композиции соответствует требованиям для марки РМВ 90/150-45. Вероятно, полиэтиленовый воск адсорбирует масло и образует отдельную дисперсную фазу, что вызывает рост вязкости и, как следствие, повышение теплостойкости битума.

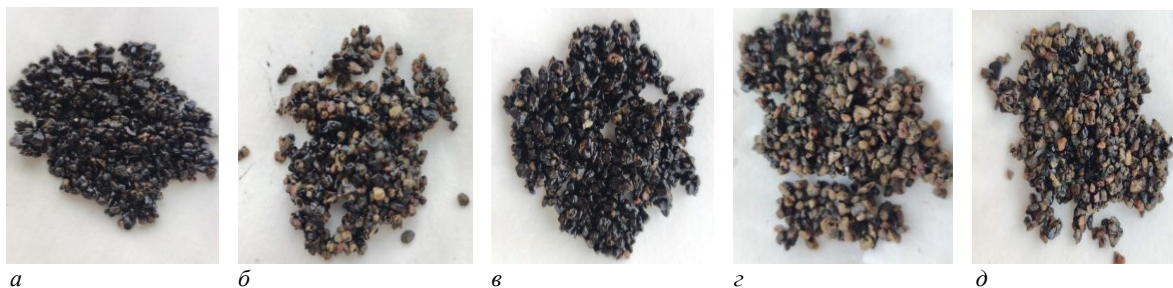
Согласно полученным результатам, модифицированный битум с использованием полиолефильных полимеров, таких как полиэтиленовый воск, вспененный полиэтилен, подходит для теплого умеренного климата и умеренных транспортных нагрузок. Анализ стойкости к затвердеванию при 163 °С показал, что вовлечение полимеров приводит к увеличению температуры размягчения от 4 до 13 °С. Максимальный показатель увели-

чения (до 31%) установлен для пленки ПВД. Вместе с тем изменение температуры размягчения, остаточной пенетрации и изменению массы после старения соответствуют требованиям ТПНА.

Компаундирование битума полимерами, растворенными в отработанном индустриальном масле, приводит к возрастанию пенетрации от 2,4 до 3,6 раза, что значительно уменьшает твердость битума и является следствием растворения битума отработанным индустриальным маслом. Максимальное возрастание пенетрации установлено для низкомолекулярного полиэтилена, минимальное – для воска. Полученные образцы с воском соответствуют требованиям для марки РМВ 90/150-45. Значение температуры вспышки для всех образцов соответствует стандартам, что обеспечивает соблюдение требований пожарной безопасности. Анализ растворимости в толуоле показал, что все образцы, кроме содержащих пленку ПВД, также соответствуют стандартам. Анализ индекса пенетрации выявил, что все исследуемые образцы попадают в требуемый диапазон от -1,5 до +0,7, при этом дисперсная структура полученных композиций наиболее приближена к типу золь-гель, оптимальному с точки зрения качества дорожного битума.

Полученные результаты свидетельствуют, что во всех образцах компаундированного битума полиолефильными полимерами и отработанным индустриальным маслом понижается температура хрупкости, т.е. улучшается морозоустойчивость композиций. Вероятно, распределение в свободной дисперсной фазе битума полимера приводит к межструктурной пластификации, что повышает подвижность пространственной дисперсной структуры, при этом не снижая ее прочность. Максимальная депрессия Δt 11,5 °С установлена для низкомолекулярного полиэтилена. Различная депрессия у образцов, возможно, связана с тем, что полимеры воска, низкомолекулярного полиэтилена, вспененного полиэтилена распределены в виде сетки в битуме при низких температурах, а макромолекулы пленки из-за высокой молярной массы полимеров – в виде свернутых глобул. Рассчитанный интервал пластичности всех образцов соответствуют требованиям ТПНА. Полимерный каркас полиолефильных полимеров обеспечивает, с одной стороны, прочность при повышении температуры, с другой – деформативные свойства при понижении температуры, расширяя диапазон работоспособности модифицированного битума. По показателю «упругое восстановление» после растяжимости все образцы компаундированного битума соответствуют требованиям ТПНА. Анализ изменения растяжимости битума при 25 °С показал, что с добавлением полиолефильных полимеров в битум растяжимость ухудшается во всех образцах (кроме низкомолекулярного полиэтилена), битум становится менее эластичным. Вероятно, глобулы высокомолекулярных полимеров выступают концентраторами напряжения, что и способствует обрыву нити битума.

Изучено сцепление модифицированного битума с поверхностью минерального материала. Анализ выполняли на песчано-гравийной смеси фракции от 2 до 5 мм. Образцы исходного и модифицированного до и после кипячения в течение 30 мин приведены на рисунке.



a – битум без добавок; *б* – битум с полиэтиленовой пленкой; *в* – битум со вспененным полиэтиленом; *г* – битум с полиэтиленовым воском; *д* – битум с низкомолекулярным полиэтиленом

Рисунок. – Результаты анализа адгезии по песчано-гравийной смеси

Ухудшение адгезии связано с тем, что полиолефины имеют плохую совместимость с песчано-гравийной смесью из-за неполярной природы и высокой степени кристалличности. Удовлетворительная адгезия отмечена для вспененного полиэтилена (поверхность минерального материала покрыта битумом более чем на $\frac{3}{4}$). Для повышения адгезии с минеральным наполнителем возможно вовлечение адгезивного агента в полимерномодифицированное вяжущее.

Заключение. Таким образом, в результате проведенных исследований по использованию полиолефильных полимеров (пленки полиэтиленовой низкой плотности высокого давления; полиэтиленового воска ПВ-200; низкомолекулярного полиэтилена и вспененного полиэтилена) в производстве битумных материалов установлено, что вовлечение таких полиолефиновых полимеров, как вспененный полиэтилен, а также полиэтиленовый воск, растворенных в отработанном индустриальном масле, позволяет повысить его теплостойкость и морозоустойчивость, при этом расширяется интервал пластичности битума.

В целом, проведенные исследования подтвердили потенциальную возможность вторичного использования изделий из полиэтилена в производстве битумных материалов для неответственных объектов строительства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герман А.М., Ширкунов А.С., Рябов В.Г. Применение полиэтилена и стирол-бутадиенстирольных модификаторов для производства дорожных полимерно-битумных вяжущих на базе неокисленных высококипящих нефтепродуктов // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2021. – № 4. – С. 55–69.
2. A comparative life cycle assessment of hot mixes asphalt containing bituminous binder modified with waste and virgin polymers / J. Santos, V. Cerezo, K. Soudani et al. // Procedia CIRP. – 2018. – № 69. – P. 194–199. DOI: 10.1016/j.procir.2017.11.046
3. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt /polymer interactions and principles of compatibility / G. Polacco, S. Filippi, F. Merusi et al. // Advances in Colloid and Interface Science. – 2015. – № 224 – P. 72–112. DOI: 10.1016/j.cis.2015.07.010
4. Phase field simulation and microscopic observation of phase separation and thermal stability of polymer modified asphalt / M. Liang, X. Xin, W. Fan et al. // Construction and Building Materials. – 2019. – № 204. – P. 132–143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.180
5. Phase behavior and hot storage characteristics of asphalt modified with various polyethylene: Experimental and numerical characterizations / M. Liang, X. Xin, W. Fan et al. // Construction and Building Materials. – 2019. – № 203. – P. 608–620. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.095
6. Nouali M., Ghorbel E., Derriche Z. Phase separation and thermal degradation of plastic bag waste modified bitumen during high temperature storage // Construction and Building Materials. – 2020. – № 239. – P. 117872. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117872
7. Evaluation of the effect of processed plastic additives on the properties of paving grade bitumen / M. Gajewski, R. Horodecka, W. Bańkowski et al. // Roads and Bridges. – 2023. – № 22(03). – P. 287–307. DOI: 10.7409/rabd.023.015
8. Коваленко П.В. Исследование свойств битумно-полимерных композиций // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Прикладные науки. Промышленность. – 2008. – № 2. – С. 128–133.
9. Модифицирование битумных вяжущих отходами нефтехимии / Ю.А. Булавка, К.А. Гришанин, В.С. Слепенков и др. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 2(48). – С. 75–79. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-75-79
10. Lebedzeva T.I., Bulauka Y.A. Polymer-modifier for the road bitumen manufacture of the fourth generation // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – 2020. – Vol. 2. – P. 546–552. DOI: 10.1201/9781003014638-10
11. Нефтяные композиции на основе низкомолекулярного полиэтилена / Ю.А. Булавка, С.В. Покровская, В.И. Сычевич и др. // Наука и инновации. – 2017. – Т. 6, № 172. – С. 31–33.
12. Булавка Ю.А., Петровская Ю.С., Ширабордина В.С. Современные альтернативные направления промышленного использования низкомолекулярного полиэтилена // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 103–110.

Поступила 13.04.2026

MODIFICATION OF OIL BITUMEN WITH POLYETHYLENE PRODUCTS

Y. BULAUKA, P. KOVALENKO, M. CHUDOV
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article presents the results of studies on the use of polyolephilic polymers such as high-density polyethylene film, PV-200 polyethylene wax, low-molecular-weight polyethylene, and polyethylene foam in the production of bitumen materials. It was found that the use of polyolefin polymers such as polyethylene foam and polyethylene wax dissolved in waste industrial oil improves the heat and frost resistance of bitumen while expanding its plasticity range. The studies confirmed the potential for recycling polyethylene products in the production of bitumen materials for non-critical construction projects.

Keywords: *petroleum bitumen, polymer-modified bitumen, high-density polyethylene, polyethylene wax, low-molecular-weight polyethylene, foamed polyethylene.*

СОДЕРЖАНИЕ

МАШИНОВЕДЕНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Рынкевич С.А.</i> Особенности расчета элементов тормозной системы электрического транспортного средства при торможении	2
<i>Котов А.В., Кроль Д.Г.</i> Способ оценки углов закручивания сайлентблоков в механизме привода очистки зерноуборочного комбайна	7

ТРАНСПОРТ

<i>Хасиневич Е.Я., Иванов В.П., Коржова А.В., Кухаренок Г.М., Мозалевский Д.В.</i> Разработка и оценка адаптивного алгоритма предотвращения блокировок транспортного узла	14
<i>Капский Д.В., Коржова А.В., Иванов В.П., Мозалевский Д.В.</i> Анализ состояния дорожно-транспортной аварийности с участием велосипедистов и лиц на средствах персональной мобильности в Республике Беларусь	20
<i>Урбанович И.В., Иванов В.П., Коржова А.В., Кухаренок Г.М., Мозалевский Д.В.</i> Прогнозирование перераспределения транспортных потоков в условиях инцидентов на улично-дорожной сети	28
<i>Зеньков В.А.</i> Обоснование мест установки датчиков при диагностировании двигателей внутреннего сгорания виброакустическим методом	34
<i>Аземшиа С.А.</i> Мультимаршрутное планирование работы маршрутных транспортных средств с учетом многодеповости и режимов труда и отдыха водителей	40
<i>Кустенко А.А., Капский Д.В.</i> Повышение эффективности транспортных систем городов с трамвайным движением: от математических моделей к практическим решениям	52

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

<i>Иванов В.П., Ермак А.А., Абдумуминов Ж.А.</i> Стойкость резин к воздействию компонентов автомобильных бензинов	56
<i>Ли Ци, Булавка Ю.А.</i> Технологии борьбы с нефтяным загрязнением окружающей среды в Китайской Народной Республике	62
<i>Спиридонов А.В., Сафронова Е.В., Ехилевский С.Г., Темиров Алишер Хошим огли, Иззатов Диёр Хикматулло огли</i> Адсорбционные методы очистки дизельных топлив от ароматических углеводородов	69
<i>Иванов В.П., Булавка Ю.А., Плискин П.Н.</i> Моделирование химико-технологического процесса извлечения диметилдисульфида из побочных продуктов вторичных процессов переработки нефтяного сырья белорусского НПЗ	74
<i>Ехилевский С.Г., Емельянов В.К.</i> Технология и техника ликвидации пожаров нефти и нефтепродуктов в вертикальных стальных резервуарах	84
<i>Коваленко П.В., Булавка Ю.А.</i> Современные технологии упаковки и транспорта нефтяного битума	88
<i>Булавка Ю.А., Коваленко П.В., Чудов М.А.</i> Модифицирование нефтяного битума изделиями из полиэтилена	92